

Université de Nancy — Faculté des Sciences

THÈSES

présentées

à la Faculté des Sciences de Nancy

pour obtenir

le titre de Docteur de l'Université de Nancy

Mention " Sciences "

par

César PARTENI ANTONI

Ingénieur électricien de l'Institut Électrotechnique de Jassy
Assistant à la Faculté des Sciences de Jassy (Roumanie).

**PREMIÈRE THÈSE : Contribution à l'étude expérimentale et théorique
de la commutation dans les machines à courant continu.**

DEUXIÈME THÈSE : Proposition donnée par la Faculté.

Soutenues le 27 mai 1925 devant la Commission d'examen

Président : M. VOGT

Examineurs { M. GUTTON
M. MAUDUIT



ÉDITEUR

12, Place de Laborde, 12
PARIS (VIII^e)

Université de Nancy — Faculté des Sciences

THÈSES

présentées

à la Faculté des Sciences de Nancy

pour obtenir

le titre de Docteur de l'Université de Nancy

Mention " Sciences "

par

César PARTENI ANTONI

Ingénieur électricien de l'Institut Électrotechnique de Jassy
Assistant à la Faculté des Sciences de Jassy (Roumanie).

PREMIÈRE THÈSE : Contribution à l'étude expérimentale et théorique
de la commutation dans les machines à courant continu.

DEUXIÈME THÈSE : Proposition donnée par la Faculté.

Soutenues le 27 mai 1925 devant la Commission d'examen

Président : M. VOGT

Examineurs { M. GUTTON
M. MAUDUIT



ÉDITEUR

12, Place de Laborde, 12

PARIS (VIII^e)

Université de Nancy - Faculté des Sciences

Doyen : M. PETIT

Assesseur : M. GAIN

Professeurs honoraires : MM. BLONDLOT, CARTAN, BLAISE, LE MONNIER,
THOULET, MULLER, GUYOT.

Chargé de cours honoraire : M. MILLOT

Professeurs :

MM. PETIT.....	Chimie agricole.
VOGT.....	Mathématiques appliquées.
GUNTZ.....	Chimie minérale.
CUÉNOT.....	Zoologie.
GAIN.....	Botanique.
MAUDUIT.....	Electrotechnique.
GUTTON.....	Physique.
HUSSON.....	Mécanique rationnelle.
LEAU.....	Calcul différentiel et intégral.
BOURION.....	Chimie physique et Electrochimie.
DARMOIS (E.).....	Physique.
VAVON.....	Chimie organique.
TRAVERS.....	Chimie industrielle.
DARMOIS (G.).....	Analyse supérieure.
LONGCHAMBON.....	Minéralogie.
FALLOT.....	Géologie.
COURTOT.....	Chimie appliquée à la teinture.
CORNUBERT.....	Chimie.
BOUIN.....	Zoologie appliquée.
GRUMBACH.....	Physique.
CROZE.....	Physique.

Chargé de cours :

M. JOLY.....	Géologie de Lorraine.
--------------	-----------------------

Maîtres de conférences :

MM. MENTRÉ.....	Mécanique appliquée.
RAYBAUD.....	Botanique.

Secrétaire : M. BERTRAND.



A

Monsieur Alexandre MAUDUIT

Professeur d'Electrotechnique
à la Faculté des Sciences de Nancy.

C. P. A.

PRÉFACE

C'est dans les laboratoires de l'Institut électrotechnique de la Faculté des Sciences de Nancy que nous avons effectué de décembre 1923 à janvier 1925, les travaux dont nous publions ici les résultats.

Nous avons pu le faire grâce à la générosité de l'Université de Nancy qui a bien voulu accorder une bourse de perfectionnement à deux licenciés ès Sciences de l'Université de Jassy (Roumanie),

Nous remplissons un agréable devoir en exprimant nos profonds remerciements au Conseil de l'Université de Nancy qui, par cette décision, a su, dans les moments difficiles que nous traversons, nous encourager dans la voie des recherches scientifiques. Nous assurons particulièrement de notre gratitude M. Adam, Recteur de l'Université de Nancy et M. Petit, Doyen de la Faculté des Sciences qui, en toute occasion, nous ont honoré de leur haute sollicitude, ainsi que MM. les professeurs de la Faculté des Sciences de Jassy, qui nous ont présenté comme candidat à l'attribution d'une de ces bourses.

Nous demeurerons profondément et sincèrement reconnaissant à M. le professeur Mauduit, directeur du Laboratoire d'Electrotechnique, des précieux conseils qu'il nous a donnés et de l'aide bienveillante qu'il nous a sans cesse prodiguée en nous guidant dans notre travail. Nous le remercions vivement d'avoir mis à notre disposition, de la façon la plus large, le matériel de laboratoire qui nous était nécessaire et du concours généreux qu'il nous a apporté pour l'impression de cette thèse.

Nous adressons aussi nos vifs remerciements à M. Martin, chef de travaux d'Electrotechnique, à MM. Gautheret, Hubert et Vin, préparateurs, pour l'aimable concours qu'ils nous ont apporté, particulièrement en ce qui concernait la correction du présent travail; à M. Maujean, mécanicien du laboratoire et à son adjoint M. Paul Dardenne qui ont exécuté avec précision et rapidité les différents appareils dont nous avons eu besoin.

C. P. A.

PREMIÈRE THÈSE

Contribution à l'étude expérimentale et théorique de la commutation dans les machines à courant continu

Introduction

1. Au moment où les applications de l'électricité ont commencé à se développer, une des questions qui ont particulièrement attiré l'attention des constructeurs, des exploitants et des théoriciens a été celle d'une bonne commutation.

En effet, deux causes limitent, en général, la puissance d'une machine à courant continu : l'échauffement des enroulements et les étincelles qui se produisent au collecteur et dont l'importance augmente avec la charge.

La suppression des étincelles est un problème délicat et on ne peut pas encore dire qu'on soit arrivé à une solution parfaite, surtout quand il s'agit de machines à grande vitesse et de grosse puissance. Les solutions adoptées sont bien connues : le décalage des balais et l'emploi des pôles auxiliaires.

A cette dernière solution correspond, sans doute, un grand progrès dans le développement des machines à courant continu, mais il faut ajouter que les manières de calculer le nombre d'ampères-tours nécessaires sont bien loin de la précision avec laquelle on peut faire la plupart des autres calculs de construction.

Les constructeurs, en général, se sont préoccupés de réaliser des machines qui commutent de mieux en mieux pour satisfaire aux exigences de plus en plus sévères, surtout en matière de surcharge, de la part des exploitants. En même temps, ils ont soumis la question aux théoriciens et ainsi on a été amené à faire des études approfondies sur cette question. Outre son intérêt absolument pratique, ce phénomène présente

un intérêt scientifique non moins important : la résolution d'un des plus difficiles problèmes posés par la science électrotechnique.

En fait, bien que de très nombreux articles aient été publiés à ce sujet dans les revues techniques de tous les pays, les auteurs n'ont pu encore se mettre d'accord pour admettre une théorie unique. La cause principale réside dans le fait que beaucoup d'auteurs, groupés dans des « écoles », cherchent une solution dans la seule voie mathématique, laissant de côté les résultats les plus importants que l'expérience met en évidence. Ce qu'il y a de plus incompréhensible, c'est qu'une grande partie des auteurs laissent complètement de côté les études expérimentales qui ont conduit d'autres électriciens à des résultats très intéressants, expliquant d'une façon assez complète le phénomène de la commutation.

Nous nous sommes donc proposé, dans le présent travail, d'apporter une contribution, quelque peu théorique, mais surtout expérimentale, à l'étude des trois points les plus délicats et les plus controversés de la théorie de la commutation, savoir : la répartition du champ de l'induit dans les diverses conditions de fonctionnement de la dynamo, les phénomènes de contact et de production d'étincelles entre le collecteur et les balais de charbon de diverses qualités et la détermination des ampères-tours à placer sur les pôles auxiliaires ou pôles de commutation des machines à courant continu, génératrices ou réceptrices.

CHAPITRE I

Historique de la théorie de la commutation

2. L'étude sérieuse de la commutation remonte à la dernière décade du siècle passé. Nous n'avons la prétention de refaire ici ni l'historique, ni l'étude critique de cette question qui a été traitée d'une manière complète par M. Mauduit, professeur à la Faculté des Sciences de Nancy ⁽¹⁾, jusqu'à la date de 1912.

Nous nous bornerons à passer très brièvement en revue cette question, en insistant seulement sur quelques points qui seront d'ailleurs développés dans le présent travail.

Il est peut-être nécessaire de rappeler d'abord en deux mots en quoi consiste la commutation.

On sait que toute armature munie d'un enroulement se déplaçant dans le champ d'un inducteur est l'objet d'une force électromotrice alternative. Pour obtenir le courant continu, on a été conduit à employer le dispositif connu sous le nom de collecteur.

En suivant de plus près le redressement du courant périodique en courant continu, on constate que, au moment où le balai couvre au moins deux lames auxquelles aboutissent les extrémités d'une section de l'enroulement d'induit, il se produit une inversion du courant dans cette section. Le temps pendant lequel deux lames sont couvertes par le balai et, par conséquent, pendant lequel une bobine est mise en court-circuit s'appelle temps de commutation.

Ce qui intéresse particulièrement dans le mécanisme de la commutation, c'est, d'une part, de connaître la loi d'après laquelle se produit l'inversion du courant et, d'autre part, d'examiner les forces électromotrices qui prennent naissance dans la spire pendant le temps qu'elle reste en court-circuit. L'examen des deux faits est nécessaire pour la compréhension de l'ensemble du phénomène.

Les premiers auteurs qui ont conduit leurs recherches par la voie physico-mathématique, pour simplifier le problème et pour le rendre accessible aux calculs mathématiques, ont admis, par approximation, que le courant varie d'après une loi linéaire dans la spire en court-circuit. Bientôt on s'est rendu compte que ce cas n'était qu'idéal et on a admis alors la commutation non linéaire ou à densité variable.

Pour étudier ce cas général, Paul Girault et Arnold ont été amenés à admettre que la loi de variation des

chutes de tension ϵ en fonction des densités du courant j , avait une forme linéaire

$$\epsilon = a + \rho_0 j, \quad (1)$$

ces chutes de tension intervenant par la différence $\epsilon_1 - \epsilon_2$, ϵ_1 et ϵ_2 étant les valeurs correspondant à la lame avant et à la lame arrière; ρ_0 est la résistance spécifique de contact.

Rappelons que l'équation générale de la commutation est la suivante

$$\mathcal{L} \frac{di}{dt} + Ri + \epsilon_1 - \epsilon_2 = e \quad (2)$$

avec les notations :

$\mathcal{L}$, coefficient d'induction propre de la section ;

R , résistance totale de lame à lame ;

i , courant dans la section en commutation ;

e , force électromotrice produite dans la section considérée par le flux extérieur, ou en introduisant la loi linéaire des tensions aux contacts (1), on a

$$\mathcal{L} \frac{di}{dt} + Ri + (J + i) \rho \frac{T}{T-t} - (J - i) \rho \frac{T}{t} = e, \quad (3)$$

où J est le courant total qui traverse une section avant la commutation ;

T , le temps de commutation ;

ρ , la résistance de contact d'une ligne de balais.

Arnold, en collaboration avec le Dr Mie, en étudiant cette équation classique aboutit aux conclusions suivantes :

1° Si la condition

$$\lambda = \rho \frac{T}{\mathcal{L}} > 1.$$

est remplie, la densité limite j_T est toujours finie ;

2° Si, au contraire,

$$\lambda = \rho \frac{T}{\mathcal{L}} \leq 1,$$

la densité finale j_T est toujours infinie quelle que soit

la force électromotrice auxiliaire e introduite pendant le temps de commutation. Les auteurs cités plus haut admettent que les étincelles aux balais proviennent de l'exagération de la densité de courant j_T au moment final $t = T$.

Assez longtemps, ces conditions ont constitué le critérium d'une bonne commutation. Pourtant, on s'est aperçu tout de suite qu'un désaccord existait entre ces résultats théoriques et les faits expérimentaux. Il y avait des machines électriques qui, bien que ne satisfaisant pas à la condition indiquée, commutaient cependant très bien.

Du critérium établi plus haut, on concluait à la nécessité d'une grande valeur pour φ , c'est-à-dire à une grande résistance de contact. Comme suite à cette déduction, on admettait généralement que les balais les plus résistants étaient les plus favorables pour les commutations « particulièrement difficiles ».

Les contradictions signalées plus haut ont conduit à examiner de plus près le point de départ de ces conclusions : la forme de l'équation (1) elle-même.

M. Mauduit, dans la thèse citée, a entrepris de résoudre cette difficulté. A l'aide d'un dispositif spécial qu'il a employé, il a pu démontrer très nettement le rôle des résistances de contact entre balais et collecteur et en déduire les lois qui gouvernent le phénomène. Dans ses conclusions, l'auteur admet que cette loi de variation ne peut être mise, en aucun cas, sous une forme linéaire, car la tension de contact ne croît pas indéfiniment quand la densité du courant s'accroît.

La différence essentielle est la suivante. D'après l'école d'Arnold, une fois le balai échappé du contact, c'est-à-dire au moment $t = T$ (T étant le temps de commutation), le courant prend forcément la valeur $-J$ (si on admet qu'au début de la commutation la valeur du courant était $+J$). D'après M. Mauduit, par contre, la commutation ne se termine pas forcément au temps $t = T$ et, par suite, à ce moment-là le courant n'est pas complètement renversé dans la bobine en court-circuit, et il y a coupure au balai.

En ce qui concerne le critérium d'une bonne commutation, les conditions exigées par l'école d'Arnold se sont montrées en défaut comme nous l'avons dit ; il résulte de nombreuses mesures que M. Mauduit a faites que la tension de contact, loin de dépasser toute limite, est de l'ordre de grandeur de 1 à 2 v, pour les balais classiques du type Z de la Société Le Carbone. Cette conclusion devrait apporter d'importants résultats en ce qui concerne les théories mêmes sur la commutation.

D'autre part, on a constaté également que la résistance de contact joue un rôle beaucoup moins important que celui qu'on lui accorde dans la théorie d'Arnold et de son école. D'ailleurs, d'après M. Mauduit, les balais en charbon se comportent mieux dans la commutation que les balais métalliques non pas tant par leur résistance plus grande, mais par leur propriété spéciale d'étouffer l'étincelle. Les expériences que nous avons faites et sur lesquelles nous aurons l'occasion de revenir justifient, à notre avis, cette opinion.

3. Une question très importante et très controversée est celle des forces électromotrices qui entrent en jeu dans la période de commutation. Elle a formé l'objet de nombreuses discussions.

L'école d'Arnold admet une décomposition arbitraire des forces électromotrices induites dans la section. Cette manière de décomposer les forces électromotrices a été exposée pour la première fois dans une revue anglaise ⁽²⁾ ; le système admis est de considérer la force électromotrice totale e comme la résultante de deux autres forces électromotrices e_K et e_Z , telle que l'on ait

$$e = e_K + e_Z.$$

La force électromotrice e_K est déterminée dans l'hypothèse, admise a priori, d'une commutation à densité de courant constante sous balais ; la deuxième e_Z prend naissance seulement dans le cas d'une commutation à densité variable. On suppose que ces deux forces électromotrices agissent indépendamment l'une de l'autre et que les courants engendrés se superposent tout simplement dans la bobine en court-circuit.

Cette école sépare donc aussi arbitrairement les champs qui engendrent ces forces électromotrices. Le champ résultant est divisé en deux parties : une première partie, celle qui donne naissance à la force électromotrice e_K , doit varier linéairement en fonction du temps ; la deuxième partie, celle qui produit la force

électromotrice e_Z , dépend de $L \frac{di_Z}{dt}$ où L est le coefficient de self-induction d'une section dans la position de commutation et i_Z , un courant supplémentaire de commutation. Si on examine les exemples donnés par Arnold ⁽³⁾, on trouve que l'inductance L est calculée d'après un procédé assez arbitraire. Ce coefficient contient seulement les fuites entre la section en commutation et les autres sections, donc il est trop petit comme valeur numérique.

Le professeur Pichelmayer ⁽⁴⁾, en étudiant la commutation, décompose la force électromotrice qui entre en jeu pendant le court-circuit d'une spire en trois forces électromotrices élémentaires

$$e_a = e_s + e_{qs} + v_w e_{q1},$$

où e_s est la tension induite dans la spire en commutation ;

e_{q1} et e_{qs} , les tensions dues au champ transversal pour les portions de la spire logées dans le fer de l'armature et dans l'air ;

w_w , le rapport entre la longueur de la spire placée dans le champ de commutation et la longueur totale de la spire.

Pichelmayer recommande une formule pour le calcul de cette expression sur laquelle nous allons revenir en étudiant les critères d'une bonne commutation.

Le professeur Niethammer ⁽⁵⁾ a contesté l'exactitude d'un coefficient préconisé par le premier, mais, après discussion, il a embrassé le même point de vue en ce

qui concerne la composition des forces électromotrices seulement.

Dans la même année 1912, en Amérique, B.-G. Lamme⁽⁶⁾ dans un mémoire examine la même question, surtout en vue du calcul des pôles auxiliaires. L'auteur décompose les flux qui entrent dans la commutation en trois parties :

- a) Le flux produit par l'armature dans la zone inter-polaire ;
- b) Le flux des têtes de bobines ;
- c) Le flux des entailles, c'est-à-dire de dent à dent.

Pour chacun de ces flux, l'auteur donne des formules que nous examinerons dans le chapitre relatif à la distribution des champs dans l'entrefer.

Plus récemment, Wilhelm Oelschläger⁽⁷⁾ emploie la même décomposition que les précédents. La force électromotrice de commutation e_c se compose, d'après l'auteur, de deux parties

$$e_c = e_r + e_q,$$

e_r étant la force électromotrice de réactance ou de fuites et e_q , la force électromotrice produite par le champ transversal de l'armature.

Chacune de ces forces électromotrices est divisée aussi en deux parties, une pour la portion de la spire logée dans le fer de l'armature et l'autre, pour la connexion frontale. La formule finale s'écrit

$$e_c = e_{ra} + e_{rs} + e_{qa} + e_{qs},$$

a est l'indice pour la portion qui se trouve dans le fer ; s , pour la portion qui est dans l'air.

Tous ces auteurs, en résumé, conçoivent le champ résultant qui entre dans la commutation comme une superposition de plusieurs champs élémentaires : deux pour l'école d'Arnold, trois pour Lamme. Ils considèrent toujours que la spire en court-circuit coupe les champs magnétiques produits par l'armature. Cette conception, d'après ce que le professeur américain Adam a fait ressortir dans la discussion qui a suivi le mémoire de Lamme (voir la note 6), suppose que les champs sont stationnaires, fait qui n'est vrai que dans le cas d'une commutation linéaire ; or, comme ce cas-là a été reconnu purement idéal, on comprend facilement que cette manière d'imaginer les flux n'est que tout à fait arbitraire.

4. A toutes ces théories, M. Mauduit, dans sa thèse, oppose une conception différente. Une première différence réside dans le fait que le champ de l'armature n'est pas stationnaire, mais, au contraire, se déplace en même temps que la section, tant que le courant reste constant dans les sections commutées. Dans ces conditions, la bobine occupe la même position relative par rapport au champ et, par conséquent, on ne peut pas admettre l'existence de la force électromotrice e_p rencontrée plus haut parce que son existence est justement basée sur le fait que la section en court-circuit coupe ce champ magnétique pendant la rotation de l'induit.

Cette position relative reste la même tant qu'un balai supposé très étroit occupe la même lame du collecteur. Au moment où il chevauche sur deux lames et met par conséquent une bobine en court-circuit, le champ de l'induit tend, d'une part, à avancer du fait du mouvement et, d'autre part, à retarder à cause de la variation du courant dans la section ; suivant le cas, l'une ou l'autre de ces deux actions l'emporte, mais après le temps de commutation T le champ reprend la même position, si le balai couvre une lame ou un nombre entier de lames.

Le retard dans le mouvement du champ est absolument indépendant de la vitesse de rotation de l'induit et il ne dépend que de la loi de variation du courant en fonction du temps dans les sections commutées, pratiquement de $\frac{di}{dt}$.

Pour calculer la force électromotrice qui entre dans le phénomène de commutation à chaque instant, il faut appliquer la loi générale de l'induction et écrire que cette force électromotrice est égale à $-Z \frac{d\Phi}{dt}$, où Z est le nombre de spires de la bobine en court-circuit et Φ , le flux résultant qui traverse cette bobine.

La variation instantanée du flux dépend, d'autre part, du courant qui traverse la section pendant le court-circuit ; mais cette valeur du courant est très difficile à établir, parce qu'elle est influencée par les phénomènes des contacts balai-collecteur.

Le problème posé de cette manière, on peut le dire, est inabordable, à cause justement des phénomènes de contact qui sont tellement capricieux, qu'ils rendent tout calcul absolument illusoire.

Si on se contente de chercher une valeur moyenne pour la force électromotrice induite dans la section pendant le temps de commutation T , il faut considérer la variation totale de flux pendant ce laps de temps. M. Mauduit a fait remarquer que, pour une dynamo avec induit denté en tambour et bobinage diamétral, le nombre d'encoches étant pair et les balais, calés à la ligne neutre, couvrant une seule lame, on peut considérer comme flux qui traverse la bobine en court-circuit, le flux qui s'échappe de la dent autour de laquelle se fait la commutation. Si Z représente toujours le nombre de spires d'une bobine, φ le flux qui s'échappe de la dent en question et T le temps de commutation, la force électromotrice engendrée dans la section sera, en valeur moyenne, $\frac{2 Z \varphi}{T}$.

Dans le cas idéal, celui de la commutation linéaire, avec balais de la largeur d'une lame, le déplacement du champ de l'induit, dû au mouvement de celui-ci, est inversé et égal au retard dû à la variation de courant dans la section et, dans ce cas, tout à fait exceptionnel, le champ résultant reste stationnaire. Dans tous les autres cas, cette hypothèse de la stabilité des champs est inadmissible et il faut considérer que le champ exécute une série d'oscillations, dont la fréquence correspond au passage d'une lame sous un point fixe du balai.

D'autre part, la force électromotrice induite dans la bobine en court-circuit, les balais étant calés à la ligne neutre, a comme valeur $\mathcal{E} \frac{di}{dt} - \Sigma \mathcal{N} \frac{di}{dt}$; mais cette fois $\mathcal{E}$ est une grandeur bien déterminée, c'est la pleine inductance de la section, valeur beaucoup plus grande que le L de l'école d'Arnold et $\mathcal{N}$ est l'inductance mutuelle de la section et des autres sections commutées en même temps.

Dans un induit à bobinage diamétral et à deux sections par encoche, la valeur de la force électromotrice induite peut atteindre $-2\mathcal{E} \frac{di}{dt}$, dans l'hypothèse que les deux sections commutent en même temps.

Si, au point de vue de la composition des champs qui produisent la force électromotrice de commutation,

des différences tellement importantes existent, au contraire, presque tous les auteurs sont d'accord pour dire que le champ le plus important, celui qui engendre la force électromotrice de commutation, se trouve dans la zone interpolaire.

M. Marius Latour ⁽⁸⁾ arrive dans un mémoire à la conclusion suivante: « pour obtenir une commutation parfaite, il faut annuler le champ de l'induit en cette région de la périphérie magnétique de l'induit où s'opère la commutation, c'est-à-dire faire $\phi = 0$. »

D'après ce que M. Mauduit a fait remarquer, il ne faut pas oublier que les têtes de bobines, même dans ce cas, coupent un flux et donnent donc naissance à une force électromotrice. Pour que la commutation soit parfaite, il faut produire une force électromotrice qui puisse compenser celle qui est produite par les têtes de bobines.

CHAPITRE II

Étude expérimentale des champs dans la dynamo

A. Champs statiques. — 5. Pour déterminer une force électromotrice, d'après les lois élémentaires de l'électrotechnique, il faut connaître les éléments suivants : la vitesse à laquelle la bobine tourne, le nombre de spires qui composent la bobine, la surface traversée par le champ magnétique et le champ magnétique lui-même. De ces éléments, les trois premiers, vitesse, nombre de spires et surface sont toujours facilement connus. Le quatrième élément contient au fond toute la difficulté du calcul de ces forces électromotrices. Presque tous les constructeurs possèdent une formule personnelle et empirique pour les calculer. Les théoriciens ont essayé de donner des formules déduites tantôt de la théorie, tantôt de l'expérience.

Le champ qui entre dans ces calculs est celui qui s'échappe de la dent autour de laquelle se fait la commutation, ainsi que M. Mauduit l'a précisé.

Normalement, dans une dynamo à courant continu, l'induit tourne dans une carcasse magnétique dont le système inducteur est excité au maximum. Pour simplifier le problème, on peut examiner les cas suivants, de plus en plus simples :

1° L'induit sans être parcouru par aucun courant se trouve dans sa carcasse magnétique, les inducteurs étant excités ;

2° L'induit parcouru par le courant se trouve dans sa carcasse magnétique avec les inducteurs non excités ;

3° L'induit sorti complètement de sa carcasse magnétique est parcouru par un courant.

a) Induit dans l'air. — 6. Nous avons commencé nos études par le cas le plus simple, le troisième.

Nous avons sorti l'induit de manière qu'il soit éloigné de toute pièce magnétique. Nous l'avons alimenté à l'aide d'une source extérieure, les balais ne couvrant qu'une seule lame.

1. DYNAMO RECHNIEWSKI. — Le premier essai a été fait avec l'induit d'une dynamo à courant continu Rechinowski du Laboratoire d'Electrotechnique de l'Université de Nancy.

Les constantes de cette machine bipolaire sont les suivantes : puissance, 5,75 kw ; tension, 115 v ; vitesse,

1750 t : mn ; induit en tambour denté ; denture rectangulaire. Le bobinage est un tambour diamétral avec 18 sections, chacune de 6 spires, placées dans 18 encoches à raison de deux demi-sections superposées dans chaque entaille. Le pas des dents sur la périphérie de l'induit est de 2,41 cm ; l'entaille ayant 1,1 cm d'ouverture, il reste pour la dent 1,31 cm.

Le développement périphérique de l'induit est de 43,4 cm ; le pas polaire $\varpi = 21,7$ cm, l'épanouissement polaire $b = 15,3$ cm ; donc nous aurons

$$\beta = \frac{b}{\varpi} = \frac{15,3}{21,7} = 0,705.$$

Le collecteur comporte 18 lames, avec un diamètre de 10,5 cm ; donc le pas d'une lame, y compris l'isolant, est de 1,83 cm.

Nous nous sommes proposé d'étudier, d'après ce que nous avons dit, la distribution du champ à la périphérie de cet induit, quand il est parcouru par un courant provenant d'une source extérieure, les balais étant calés diamétralement et ne couvrant qu'une seule lame.

Dans ce but, nous avons disposé une bobine d'exploration sur une dent de l'induit, comme on peut l'observer sur la figure 1. Cette bobine comprenait 30 spires en fil très fin ; les dimensions moyennes sont 2,5 et 24 cm, d'où résulte une surface totale moyenne de

$$S = 2,5 \times 24 \times 30 = 1800 \text{ cm}^2.$$

A l'aide d'un galvanomètre balistique et suivant les méthodes ordinaires de mesure d'un champ magnétique, on pouvait calculer ce dernier. La variation de flux dans la bobine était réalisée à l'aide d'un interrupteur à ressort très puissant, de manière à avoir une coupure très brusque du courant d'alimentation.

Les mesures ont été faites en deux sens, à l'établissement et à la coupure du courant, et en prenant la moyenne. Après chaque mesure, la bobine restant fixe, on avançait d'une lame les balais placés d'une façon rigoureusement diamétrale. En procédant de cette manière, on peut mesurer le champ qui s'échappe d'une dent quand les balais occupent toutes les positions possibles. Si, au contraire, on garde les balais

fixes et que l'on change chaque fois la position de la bobine le résultat est le même. Nous avons adopté le premier procédé qui a l'avantage d'être applicable même dans le cas où il y a plus de deux demi-sections par entaille et qui donne des résultats plus précis.

7. On sait que l'armature d'une machine à courant continu alimentée en deux points diamétraux se comporte comme un ensemble de deux aimants accolés par

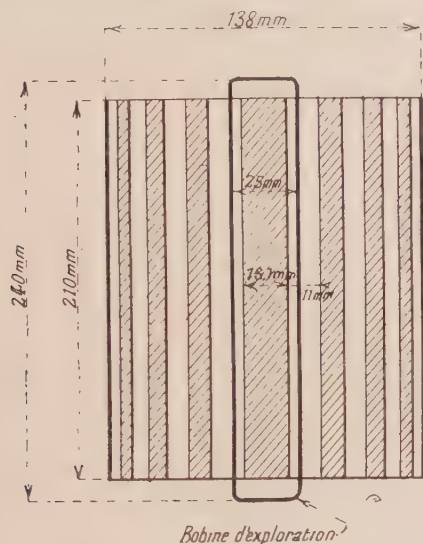


Fig. 1. — Disposition de la bobine d'exploration pour l'étude de la distribution du champ à la périphérie d'un induit.

leurs pôles de même nom. Les lignes de force qui se produisent dans ce cas sont obligées de franchir une distance quelconque, mais en traversant un milieu non magnétique, l'air. Evidemment, dans le cas d'un induit dans sa carcasse, les lignes de force se ferment par différents chemins, de ré reluctances diverses.

Les auteurs donnent, comme forme de la courbe de distribution du champ de l'armature, celles qui sont indiquées dans les figures 2, 3 et 4; cette courbe est

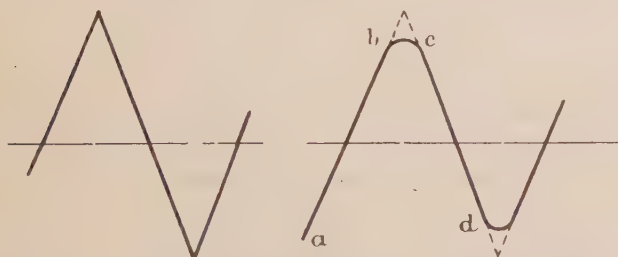


Fig. 2. — Forme du champ de l'induit, d'après Arnold.

Fig. 3. — Forme du champ de l'induit, d'après Rüdenberg.

très fréquemment nommée courbe de réaction de l'induit ou aussi courbe du champ de l'induit.

La figure 2 représente la forme indiquée par Arnold⁽⁹⁾ et beaucoup d'autres auteurs pour ce champ

qui est supposé produit par une armature possédant une couche de courant uniformément distribuée à sa surface.

La figure 3 représente l'allure de ce champ d'après Rüdenberg⁽¹⁰⁾. L'auteur indique que les portions de ligne droite ab et cd qui représentent le champ sous les pièces polaires sont raccordées dans l'espace intermédiaire par une courbe qui a la forme d'un arc de parabole. L'auteur ajoute que cette forme existerait seulement pour la commutation linéaire et dans tout autre cas serait celle pointillée, c'est-à-dire en angle.

La figure 4 indique la forme de ce champ exposée plus récemment par G.-G. Lewis⁽¹¹⁾.

Ces trois formes, se réduisant en somme à deux fran-



Fig. 4. — Forme du champ de l'induit, d'après C.-G. Lewis.

chement différentes, divisent tous les auteurs qui ont étudié ces questions de répartition du champ ou de commutation.

Nous avons employé l'induit de la machine Rechniewski décrit plus haut, alimenté par une source exté-

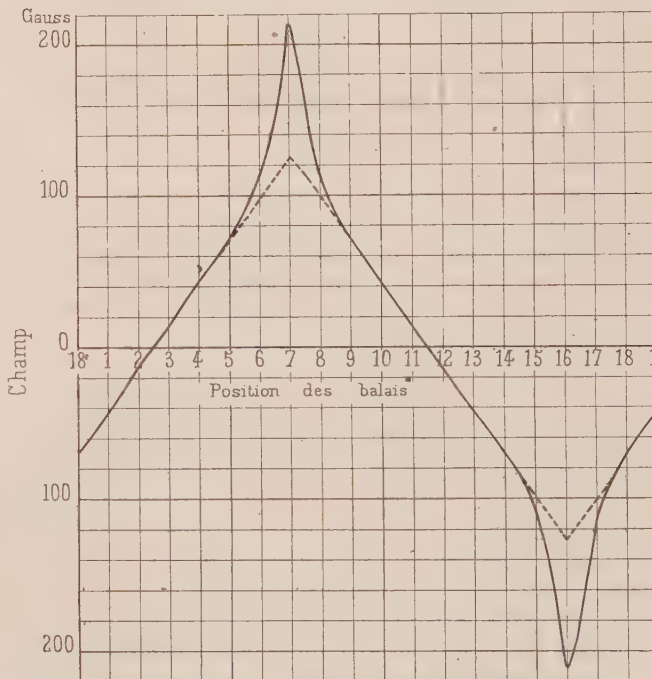


Fig. 5. — Champ de l'induit dans l'air de la dynamo Rechniewski.

rieure débitant un courant de 30 A et, en utilisant le procédé indiqué, on arrive à une courbe qui est représentée en figure 5.

Dans cette courbe, on a porté en abscisses les diffé-

rentes positions des balais et en ordonnées, les valeurs correspondantes du champ.

8. La forme de cette courbe semble, à première vue, tout à fait étonnante, car elle est complètement différente des formes considérées comme classiques et dont nous avons précédemment parlé.

Une première partie de cette courbe, celle comprise entre les points 18-5 et 9-14 (six positions) suit la loi admise généralement de variation linéaire des ampères-tours. Cette portion correspond à la partie qui se trouve sous la pièce polaire, dans l'hypothèse que l'induit se trouve dans sa carcasse. En effet, pour un pas polaire, on a 9 lames et le rapport β étant 0,705, on en déduit que, sous la pièce polaire, il y a 6,33 lames.

De part et d'autre de ces points, la caractéristique de cette courbe consiste dans la grande pointe qu'elle accuse. Pour une seule lame, la valeur correspondante du champ saute de 113 gauss à 215, donc varie à peu près du simple au double. D'autre part, la pointe de cette courbe dépasse de beaucoup le sommet de l'angle formé par les droites qui représentent la distribution du champ dans les autres positions de l'induit, c'est-à-dire les positions qui correspondent aux épanouissements polaires.

On observe aussi que le maximum, ou la pointe de cette courbe, correspond à la position 7, les balais couvrant les lames 7 et 16. La bobine a été fixée sur la dent VII (fig. 6) au commencement de l'opération. En observant la figure et en se rappelant que le bobinage est en tambour, on voit tout de suite que la dent en question se trouve juste dans l'axe qui correspond à la ligne neutre de l'inducteur usuel, c'est-à-dire au milieu de l'arc qui unit les deux balais sur le collecteur.

Par conséquent, c'est le champ qui correspond à cette pointe qui entre dans la commutation, en supposant que les balais sont calés rigoureusement sur la ligne neutre. A cause de l'importance de ce champ dans l'étude que nous faisons, nous croyons qu'il ne sera pas sans intérêt d'examiner de plus près les raisons pour lesquelles la courbe a l'allure indiquée.

Dans un bobinage tambour, une bobine contient deux parties bien distinctes au point de vue magnétique. Une première partie est logée dans le fer de l'armature, c'est la portion vraiment active, qui produit la force électromotrice; une deuxième partie, constituée par les têtes de bobines ou connexions frontales, sert pour la mise en série des deux conducteurs d'une même bobine et pour la liaison entre bobines et collecteur.

Généralement, l'action des têtes de bobines est négligée quand on s'occupe du champ produit par l'armature. Nous ne croyons pas que cette opinion soit juste. En effet, les connexions frontales (fig. 6), une supérieure et une autre inférieure, de deux entailles voisines s'entrecroisent, de façon que chaque dent soit entourée par un circuit formé par les conducteurs actifs et par ces têtes de bobines.

Quel est le sens de circulation du courant dans ce circuit ?

Cette question est intéressante parce que chaque conducteur parcouru par un courant électrique crée autour de lui un champ magnétique, donc une circulation de lignes de force.

Deux cas différents se présentent : tantôt, dans les conducteurs qui entourent une dent, les courants ont des actions de même sens sur le flux de cette dent, tantôt ils ont des actions contraires.

Les actions sont de même sens, lorsque les courants arrivent d'un côté et repartent de l'autre autour du point de croisement.

En examinant la figure 6, on voit immédiatement

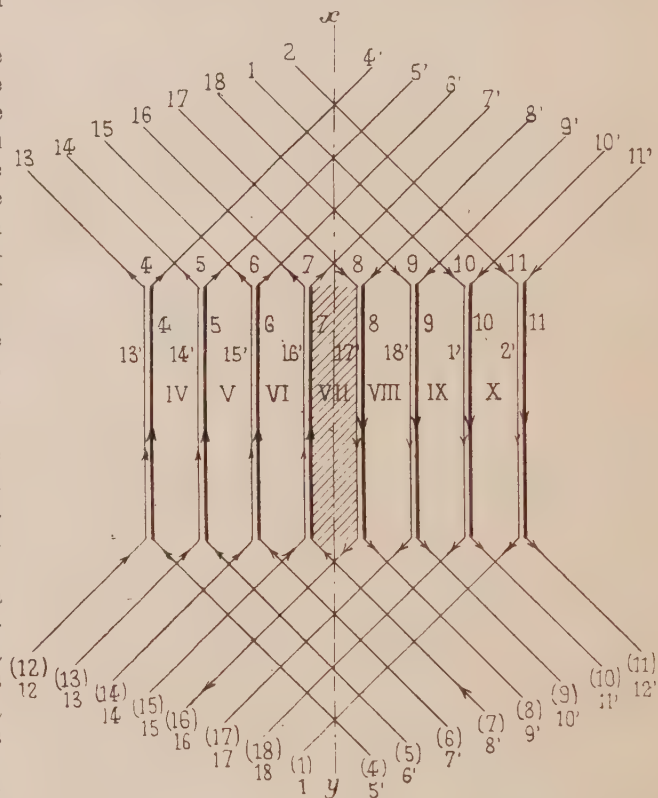


Fig. 6. — Schéma de l'enroulement développé de la dynamo R. Les balais couvrent les lames 7 et 16 et la bobine d'exploration se trouve autour de la dent VII.

que, pour les dents VII et XVI seulement, les courants dans les parties actives comme dans les connexions circulent dans le même sens autour de ces dents, tandis que, pour toutes les autres, les courants sont de sens contraires.

Ces deux dents jouissent donc d'une situation particulière. Or ce sont justement celles qui correspondent aux positions 7 et 16 sur la courbe de la figure 5. Il s'ensuit que la pointe de cette courbe peut être expliquée, au moins en partie, par le supplément dû aux ampères-tours qui circulent autour des dents en commutation. On peut aussi bien supposer que la réluctance des tubes de forces centraux est plus petite et, par conséquent qu'elle contribue aussi à la production du renforcement.

L'ordre de grandeur de cette pointe est difficile à prévoir, mais il est certain qu'elle doit être d'autant plus marquée que le nombre des dents est plus petit.

9. Nous avons relevé une courbe de distribution du champ magnétique autour d'un induit d'une machine Gramme du type supérieur. L'induit de cette machine comporte 60 bobines. Nous avons employé le même procédé que dans le cas précédent. On a collé une petite bobine d'exploration composée de 50 spires, d'une surface moyenne totale de

$$S = 50 \times 2,6 \times 6,5 = 845 \text{ cm}^2$$

qui couvrirait juste une bobine.

L'épanouissement de la pièce polaire est $b = 29 \text{ cm}$; le pas polaire est $\sigma = 39,5 \text{ cm}$, donc $\beta = \frac{29}{39,5} = 0,735$. Le collecteur contient 60 lames; donc, sous une pièce polaire, il y a $\frac{60}{2} \times 0,735 = 22$ lames; pour l'intervalle interpolaire, il reste 8 lames. La longueur de l'induit est $L = 8 \text{ cm}$. Le diamètre du collecteur est $D_c = 7,65 \text{ cm}$; le pas d'une lame, y compris l'isolant, est égal à $0,4 \text{ cm}$.

On a alimenté l'induit sorti de sa carcasse par un courant de 14 A , les balais ne couvrant qu'une seule lame.

Les résultats de ces mesures ont donné la courbe de la figure 7.

On constate immédiatement qu'elle diffère de la pré-

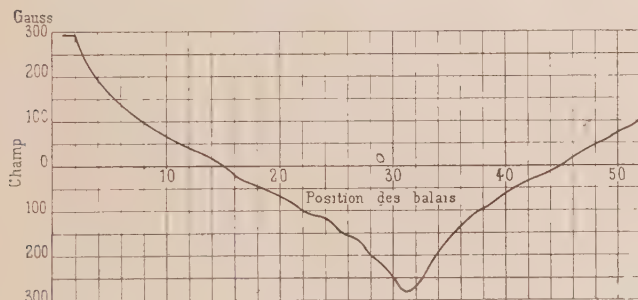


Fig. 7. — Champ de l'induit dans l'air d'un anneau Gramme.

cédente. Dans la partie qui correspond à 22 lames de la pièce polaire, pour la marche dans la carcasse, la courbe dans l'air n'est plus aussi régulière que dans le cas précédent, mais avec une approximation assez grande, on peut quand même admettre que cette position de courbe se rapproche d'une droite.

Dans l'intervalle interpolaire, la différence est beaucoup plus marquée à deux points de vue. D'abord, la pointe n'est plus aussi prononcée; elle dépasse de très peu l'angle formé par le prolongement des deux droites qui représentent le champ sous les pièces polaires. D'autre part, dans cet intervalle, l'accroissement du champ suit presque la même loi que sous la pièce polaire, le rapport entre deux ordonnées voisines étant à peu près constant. Cette remarque s'applique aussi au voisinage de la ligne des pôles de l'induit. En effet, la valeur

maximum (pour la position 31) est de 284 gauss, tandis que la moyenne de deux positions voisines est de 261 gauss; donc le rapport entre ces deux valeurs est de 1,09.

Dans le cas de l'enroulement en tambour, on a constaté une variation du simple au double entre le point pour lequel existe le maximum et les deux points voisins. L'explication de cette constatation expérimentale ne peut résider, à notre avis, que dans ce qui a été dit plus haut.

On peut déduire de ces deux courbes que le rôle des têtes de bobine n'est pas négligeable, comme le signale, par exemple, Rezelman ⁽¹²⁾.

Par conséquent, les auteurs qui étendent aux tambours, les résultats obtenus en matière de commutation sur les anneaux Gramme n'ont pas raison, surtout en ce qui concerne les champs magnétiques de la zone interpolaire. Cette remarque nous explique les contradictions que nous allons rencontrer entre les valeurs du champ de commutation obtenues par le calcul d'après les formules préconisées par différents auteurs et les valeurs que nous avons mesurées directement.

2. DYNAMO SPÉCIALE DE LA COMPAGNIE GÉNÉRALE ÉLECTRIQUE DE NANCY. — 10. Maintenant, nous allons commencer la même étude du champ statique pour l'induit de la dynamo sur laquelle nous avons poursuivi toutes nos études de commutation, études qui seront développées dans les chapitres suivants.

Cette dynamo H-100/2 spéciale, n° 16039, a été construite par la Compagnie générale électrique de Nancy pour le Laboratoire d'Electrotechnique de l'Université de Nancy.

La dynamo a été prévue pour une puissance de 5,75 kw sous 230 v, donc 25 A.

Elle est munie de pôles auxiliaires démontables pour qu'ils n'influencent pas, par leur présence, les résultats des mesures qu'on a faites.

a) *Induit*. — L'induit a un diamètre extérieur de 15,9 cm. Il comporte 24 encoches, dont les dimensions sont données dans la figure 8. L'entaille contient 6 demi-sections de 4 conducteurs; le conducteur est formé de deux fils en cuivre en parallèle, dont chacun a un diamètre de 1,3 mm nu et 1,6 mm isolé sous deux guipages en coton; en tout il y a 72 sections de 4 spires soit 576 conducteurs périphériques. La longueur de l'induit est de 15,5 cm. La longueur d'une tête de bobine est 27 cm.

Le bobinage est bipolaire parallèle, les spires embrasant 11 pleins du côté opposé au collecteur; il présente donc un léger raccourcissement.

b) *Inducteur*. — La figure 9 représente une coupe transversale de l'inducteur et en donne les dimensions principales.

L'entrefer simple sur le rayon est de 0,3 cm.

Pôles principaux. — L'épanouissement polaire est de 17,5 cm, le pas polaire de 25 cm, donc leur rapport est $\beta = \frac{b}{\sigma} = 0,7$.

Le rapport entre les ampères-tours logés sur les pôles auxiliaires et ceux d'un pas polaire est donc

$$\frac{2 \times 90 \times 25}{3 \ 600} = 1,25.$$

La vitesse normale de la dynamo est 1650 t : mn.

e) *Caractéristique relevée sur la machine.* — Quoique construite pour 1650 t : mn, la dynamo a fonctionné plus souvent entre 1000 et 1200 t : mn.

La figure 11 représente la caractéristique à vide de

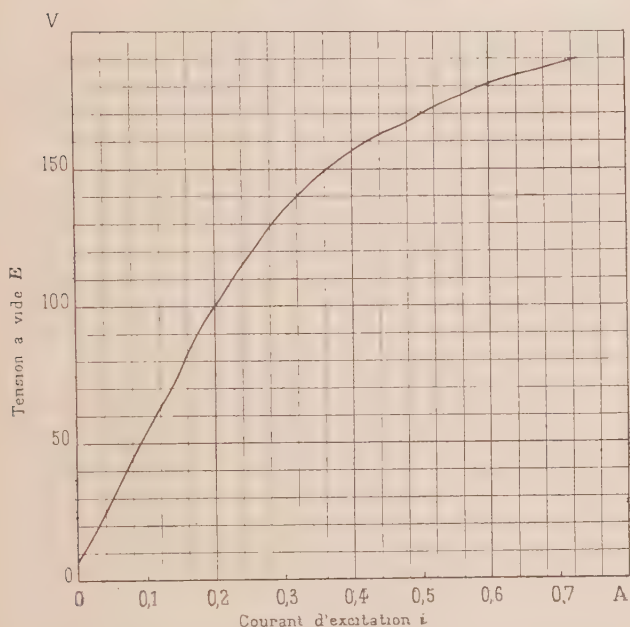


Fig. 11. — Caractéristique à vide; excitation indépendante de la dynamo spéciale H-100/2 (C. G. E); $n = 1200$ t : mn.

la machine en dynamo à courant continu et à excitation indépendante pour la vitesse de 1200 t : mn.

La résistance de l'induit entre les balais est 0,5 ohm; la résistance totale du fil de l'induit est donc de 2 ohms; la résistance d'une seule section est d'environ 0,025 ohm.

Nous avons fait sortir l'induit complètement de sa carcasse, en l'éloignant ainsi de toute pièce métallique. En adoptant le même système de numération des dents et des encoches que celui de la figure 6, nous avons fixé une bobine en fil fin autour de la dent XXIII. La bobine était faite en fil de 5/10 mm et comprenait 20 spires, de dimensions moyennes de $17,3 \times 2,1 = 36,4$ cm². La surface totale de la bobine est donc

$$S = 17,3 \times 2,1 \times 20 = 728 \text{ cm}^2.$$

Pour faire circuler le courant dans l'induit, on a fixé deux balais d'une façon rigoureusement diamétrale. Le courant, à l'aide d'un rhéostat intercalé dans le circuit, a été gardé constant pendant toute la durée de l'expérience et égal à 25 A.

Les résultats acquis ont donné la courbe de la figure 12.

En examinant cette courbe, on observe tout de suite que l'allure générale est tout à fait analogue à celle de la figure 5.

Au collecteur il y a 72 lames, $\beta = 0,7$, donc à l'épanouissement polaire correspondraient $0,7 \times \frac{72}{2} = 26$ lames et à l'intervalle interpolaire, 10 lames.

Les 26 valeurs correspondant au développement polaire sont presque en ligne droite; dans l'intervalle

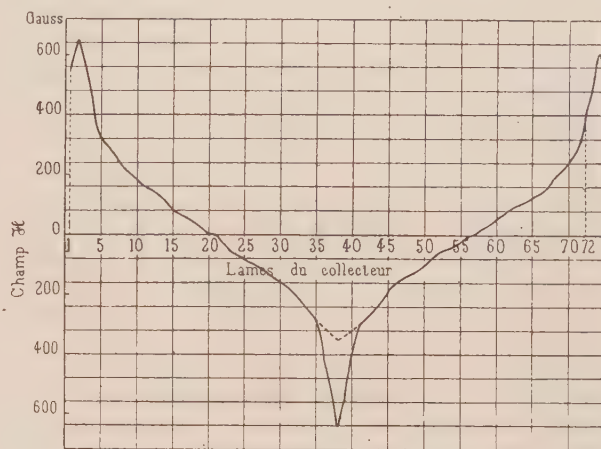


Fig. 12. — Champ de l'induit dans l'air de la dynamo H-100/2, spéciale.

interpolaire, la pointe est toujours marquée, ce qui paraît indiquer que la présence du pas raccourci ne change pas l'allure générale que la courbe présente dans le cas du pas diamétral. Il faut remarquer que la pointe est moins accusée; il nous semble que cela provient du fait que l'induit est beaucoup plus divisé que précédemment et, par suite, la variation du champ d'une dent à l'autre se fait moins sentir. Le rapport entre la valeur maximum de 639 gauss et celle de 250 gauss correspondant à la moyenne des positions du commencement et de la fin de la zone interpolaire est de 2,5. Dans le cas de l'induit en anneau dont il a été question précédemment, on trouve 1,73.

La forme de cette courbe s'explique de la même façon par la circulation des ampères-tours supplémentaires qui se superposent au champ normal produit par les ampères-tours de l'induit pour quelques dents favorisées.

11. Nous avons relevé, par le même procédé, une courbe de distribution du champ magnétique dans l'air d'un induit d'un moteur à courant continu à 4 pôles, bobinage série de la Société alsacienne de Constructions mécaniques de Belfort. La machine est du type MTY 130 et le bobinage n° 40. Les constantes principales de cette machine sont : puissance 33 ch; sous 500 v; vitesse normale, 840 t : mn; entrefer, $\delta = 0,3$ cm; pas polaire, $\sigma = 23,5$ cm; $\beta = 0,68$, 42 entailles de

9/33 mm ; 756 conducteurs périphériques, 3 sections par entailles, 3 spires par section ; diamètre de l'armature, 30 cm ; longueur de l'induit, 20 cm ; 125 lames au collecteur ; longueur de la tête de bobine, 33,2 cm.

L'induit était alimenté par un courant de 45 A. Les mesures ont été faites avec un fluxmètre Grassot (expérience faite à Belfort). La bobine d'exploration a été construite spécialement ; elle comportait 50 spires en fil fin. Dans la figure 13, en ordonnées sont portés

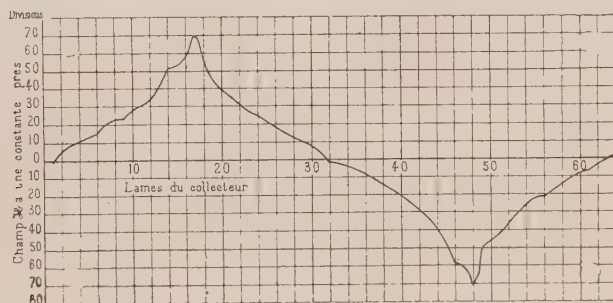


Fig. 13. — Champ de l'induit dans l'air d'un moteur MTY 130, 33 ch, 500 v, 240 t : mn (Société alsacienne de Constructions mécaniques).

les nombres de divisions correspondant à chaque position ; ils ne représentent l'intensité du champ mesuré qu'à une constante près, la constante de l'appareil, que d'ailleurs nous n'avons pu déterminer, n'ayant pas les moyens nécessaires pour faire l'étalonnage de l'appareil ; somme toute, en ordonnées, on a $\frac{B}{C}$, au lieu de B .

Même forme de courbe. Il faut faire observer que, quoique le bobinage fût diamétral, les valeurs du champ dans la zone interpolaire s'accroissent graduellement ; probablement à cause de la construction très divisée de l'induit.

Nous avons voulu relever cette courbe pour montrer que le système de bobinage, parallèle ou série, ne modifie en rien la forme même de la courbe.

β) Etude du champ magnétique d'un induit dans sa carcasse. — 12. Considérons maintenant la dynamo spéciale H-100/2 complètement montée ; mais sans pôles auxiliaires. Ceux-ci ont été déboulonnés et enlevés de manière à n'apporter aucune déformation des champs.

Nous avons fait les essais dont nous avons parlé à la fin du paragraphe 5, alinéa deuxième, l'induit étant alimenté par un courant constant, l'inducteur restant non excité et ouvert.

Nous avons calé, une fois pour toutes, les balais à la ligne neutre, en vérifiant que l'induction mutuelle de l'inducteur et de l'induit est nulle.

La mesure du champ a été effectuée par le procédé déjà indiqué : emploi de la bobine d'exploration et du galvanomètre mentionnés au paragraphe 10.

On a ainsi obtenu la courbe de la figure 14.

On observe :

1° Sous les pièces polaires, la variation du champ est bien linéaire, telle qu'on l'admet généralement ;

2° Les valeurs maxima pour les cornes polaires d'entrée et de sortie sont presque égales ;

3° Dans la zone interpolaire, la courbe présente un maximum entre deux minima, contrairement à ce qu'on admet d'habitude. Le point maximum atteint 786 gauss. On observe que cette valeur est plus grande que celle, 639 gauss, qu'on avait mesurée quand l'induit était placé dans l'air. Ceci s'explique par le fait

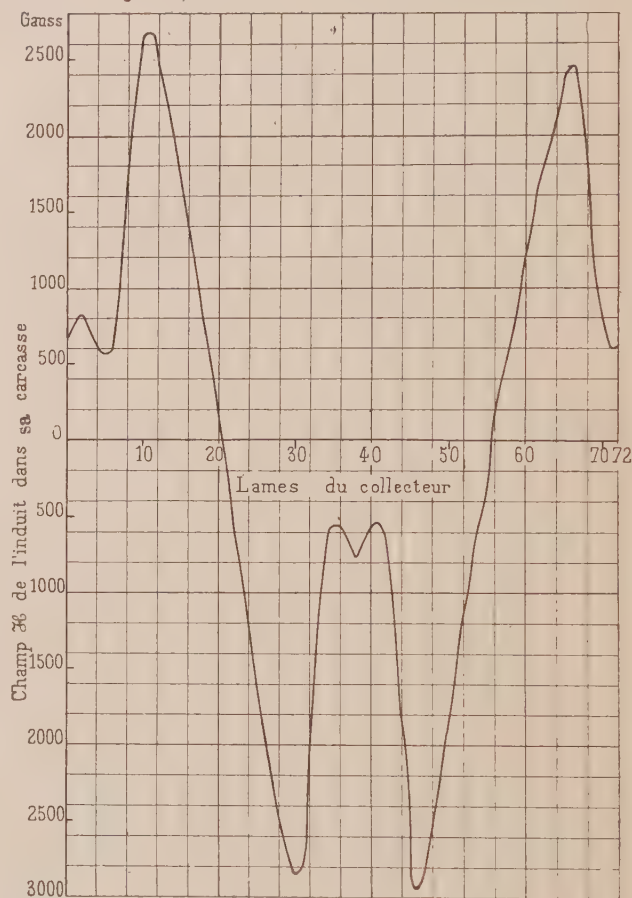


Fig. 14. — Champ de l'induit de la dynamo H-100/2 spéciale dans sa carcasse (inducteur ouvert). On coupe le courant de l'induit pour $I = 25$ A.

que les lignes de force ont une réluctance moins grande. En effet, elles ne sont plus contraintes à franchir un espace formé seulement d'air pour circuler d'une dent de commutation à l'autre. Une grande partie de leur parcours se trouve dans la carcasse inductrice dont la réluctance est presque négligeable devant celle de l'air, d'autant plus qu'il n'y a pas ici de saturation.

Ce maximum étant placé juste au milieu de la zone neutre, c'est dans le champ qu'il représente, que se fait la commutation.

Les auteurs qui se sont occupés de l'étude de la commutation ⁽¹³⁾, autant qu'il nous est apparu dans les mémoires techniques que nous avons lus, présentent cette courbe sous la forme de la figure 15. La différence

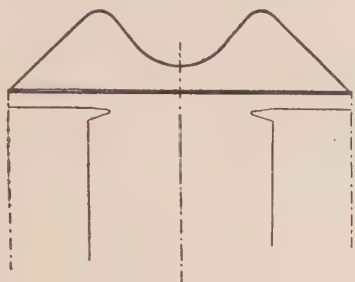


Fig. 15. — Forme du champ de l'induit dans sa carcasse (inducteur ouvert) généralement admise.

essentielle avec la figure 14 réside dans la partie correspondant à l'intervalle interpolaire.

On sait que M. Lehmann ⁽¹⁴⁾ a indiqué une méthode graphique pour le tracé des spectres magnétiques, dont on peut déduire les courbes qui représentent le champ magnétique.

M. Richter ⁽¹⁵⁾, directeur de l'Institut électrotechnique de Karlsruhe, a appliqué, en 1922, cette méthode à l'étude des courbes de la répartition du champ dans le cas d'une dynamo. Les conditions dans lesquelles se place l'auteur sont les suivantes : inducteur non excité, calage des balais (supposés infiniment minces) à la ligne neutre géométrique, induit seul parcouru par le courant. Les conditions sont donc identiques à celles dans lesquelles nous nous sommes placé nous-même. L'auteur (dans le chapitre V) aboutit à une courbe qui est absolument identique à celle de la figure 15. Il semblerait donc que cette méthode vint confirmer les idées de M. Richter et d'Arnold, en ce qui concerne la distribution du champ produit par les ampères-tours de l'induit.

Une année plus tard, en 1923, M. Lehmann ⁽¹⁶⁾ traça lui-même la courbe qui nous intéresse (fig. 22, p. 400) pour un induit à seize encoches de deux conducteurs par demi-division polaire ; M. Lehmann, à notre connaissance, est le premier auteur qui ait donné une indication exacte sur la forme du champ d'induit, quand l'induit se trouve dans sa carcasse, l'inducteur n'étant pas excité. M. Lehmann ne fournit cependant aucune explication, il se contente de signaler seulement quelques points de la courbe, sans même la tracer, mais au moins dans la zone interpolaire la forme indiquée est la même que celle que nous avons relevée expérimentalement. En ce qui concerne les valeurs que cet auteur propose pour les rapports entre le maximum de ce renforcement et les points voisins, il nous est difficile de nous prononcer, parce que les machines que nous avons eues à notre disposition n'ont pas été en nombre suffisant pour nous permettre d'en déduire une loi précise de variation. Mais il nous semble que l'auteur arrive à ce résultat en considérant

seulement l'action de la force magnétomotrice produite par l'induit et qui travaille dans différents tubes de force. La considération de différentes réluctances conduit seule l'auteur à ce résultat ; mais, d'après ce que nous avons exposé dans un alinéa précédent, il nous semble que, en plus des différentes réluctances, interviennent aussi les ampères-tours supplémentaires autour de certaines dents favorisées, comme il a été rappelé précédemment.

13. Passons maintenant à l'essai indiqué au paragraphe 5, alinéa 1. L'induit, sans être parcouru par le courant, se trouve dans sa carcasse magnétique, le système inducteur étant excité.

La résistance de l'inducteur (les deux bobines en série) mesurée par la méthode industrielle est de 343 ohms.

La tension normale de la dynamo étant 230 v, il en résulte que le courant normal qui doit traverser les bobines inductrices est de 0,67 A. Nous avons employé dans toutes ces mesures un courant $i = 0,5$ A pour le système inducteur, en tenant compte d'une augmentation de la résistance de 20 pour 100 due à l'échauffement en marche normale de la dynamo.

En utilisant la même bobine d'exploration et la même méthode pour la mesure du champ, on obtient la courbe de la figure 16.

De cette façon, on mesure le champ inducteur qui

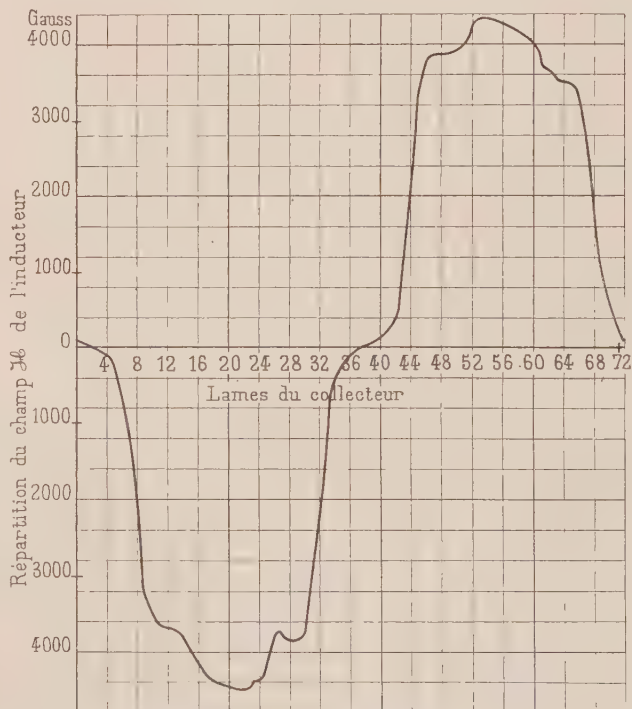


Fig. 16. — Répartition du champ de l'inducteur de la dynamo spéciale. Pas de courant dans l'induit. Coupure du courant dans l'inducteur, $i = 0,5$ A.

agit à la périphérie de l'induit, c'est-à-dire précisément le champ qui est coupé par les conducteurs logés dans les entailles.

L'allure générale de cette courbe est classique ; mais elle présente une particularité : sous les pièces polaires, le champ n'est pas constant. Cette forme tient, probablement, à la construction de la pièce polaire (fig. 9) ; l'étranglement très prononcé qu'on observe dans la zone centrale de cette pièce polaire et qui correspond à peu près aux huit positions de mesures, doit produire la déformation de la courbe.

14. Après avoir relevé les courbes qui donnent le champ inducteur et le champ de réaction d'induit, nous allons essayer de chercher la courbe résultante de la distribution du champ magnétique dans l'entrefer. Pour y arriver, on peut concevoir deux méthodes : une directe et l'autre indirecte :

1° La méthode directe consiste dans l'application des mêmes procédés que dans les cas précédents. Il faudra donc mesurer le champ total que la bobine d'exploration coupe. Or, le champ résultant existe dans une dynamo seulement au moment où l'inducteur et l'induit sont traversés par le courant en même temps.

2° L'autre méthode, indirecte, consiste à effectuer une superposition des deux champs.

Pour le moment, on va s'occuper de la deuxième méthode.

On recommande, en général, pour réaliser cette composition des champs, d'additionner la courbe du champ de l'inducteur, telle que nous l'avons relevée dans la figure 16, avec celle de la réaction de l'induit, relevée dans les conditions examinées plus haut et qui donnent la figure 14, pour avoir le champ résultant en charge d'une dynamo. La courbe de réaction de l'induit s'obtient donc en supposant qu'aucun courant ne passe dans l'inducteur. La réaction de l'induit considérée de cette manière n'est pas celle qui se présente pour une dynamo en charge, c'est-à-dire dans son fonctionnement normal. Pour avoir la courbe réelle, il faut relever la réaction de l'induit en présence des inducteurs excités. Il est nécessaire de procéder ainsi, parce que le champ qui prend naissance dans l'entrefer résulte de la composition de celui de l'inducteur et de l'induit tous les deux co-existants.

Avec une bobine d'exploration, en coupant les deux courants en même temps, c'est justement le champ résultant qu'on mesure. La présence du champ inducteur modifie sensiblement la forme du champ de réaction de l'induit, tel qu'il a été considéré plus haut. Au premier moment, on pourra être tenté de négliger le champ inducteur comme n'intervenant pas dans la question de réaction, pour la raison qu'il ne change pas au moment de la mesure. Mais ce raisonnement n'est pas juste parce que, au moment de l'établissement ou de la coupure du circuit de l'induit, par exemple, le champ de l'inducteur est modifié et ce qu'on mesure au galvanomètre balistique, quand on coupe le circuit de l'induit, ce n'est pas le champ de l'induit en présence de l'inducteur, mais la superposition du champ de l'induit et de la variation du champ inducteur due à la suppression du champ induit.

Pour obtenir le champ résultant, il faut donc super-

poser la courbe du champ inducteur seul avec la courbe du champ obtenu en coupant le circuit de l'induit en présence de l'inducteur excité. Ce serait une erreur de superposer les courbes obtenues en coupant chacun des circuits en présence de l'autre parcouru par un courant, car on enregistrerait ainsi deux fois la modification d'un des flux quand l'autre se supprime.

Pour obtenir cette courbe (fig. 17), nous avons fait passer dans l'induit un courant $I = 25$ A et dans l'in-

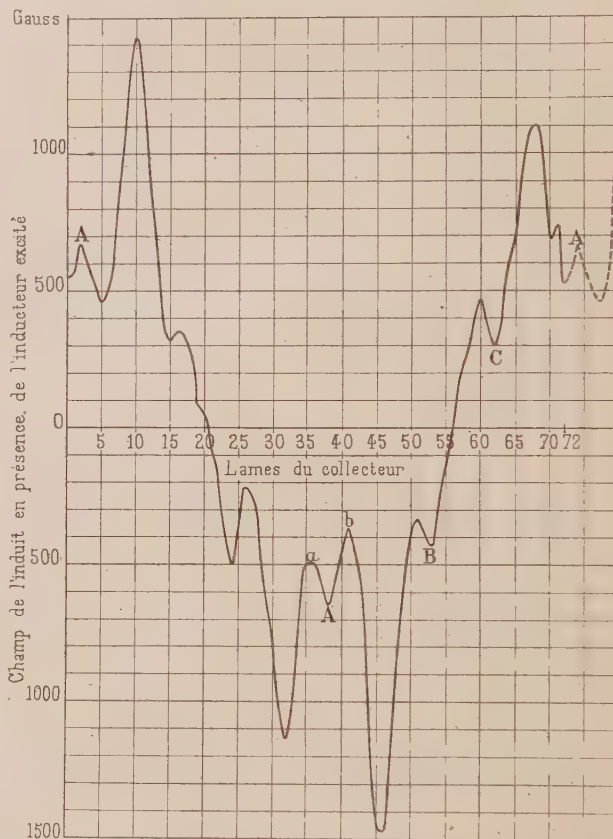


Fig. 17. — Champ de l'induit de la dynamo spéciale dans sa carcasse. L'inducteur étant excité à $i = 0,5$ A, on coupe, dans l'induit, le courant $I = 25$ A.

ducteur $i = 0,5$ A. La machine était bien calée, pour qu'elle ne bougeât pas au moment de l'établissement ou de la coupure du courant induit.

En examinant la courbe, on observe immédiatement une grande différence par rapport à celle de la figure 14. Ceci confirme notre façon de raisonner et ce que nous disions un peu plus haut en ce qui concerne la manière d'envisager la réaction de l'induit pour une dynamo en charge. La différence est très manifeste, nous ne croyons donc pas nécessaire d'insister davantage sur ce sujet.

En poursuivant l'analyse de cette courbe, on observe la présence du renforcement A au même endroit de la ligne neutre théorique de l'inducteur de la dynamo. Comme valeur numérique, on trouve 643 gauss ; donc,

à peu près la valeur obtenue dans le cas où l'induit était complètement sorti de sa carcasse (639 gauss). On observe que la valeur du champ est plus petite dans ce dernier cas, que dans celui qui donne la courbe 14 (inducteur non excité). L'explication en est fournie par le fait du commencement de saturation des

l'induit dans le fonctionnement normal de la dynamo.

Pour avoir le champ résultant dans l'entrefer, nous allons combiner les courbes représentées dans les figures 16 et 17, point par point. La résultante donne la courbe de la figure 18. La valeur du champ au point A présente un intérêt capital pour la commutation, parce que c'est cette valeur qui doit entrer dans le calcul de la force électromotrice prenant naissance dans la section en court-circuit.

15. D'après ce que nous avons dit au début de l'alinéa précédent, on peut obtenir la même courbe en utilisant une méthode directe. Il sera intéressant de faire une comparaison entre les deux courbes obtenues par ces deux méthodes.

La méthode directe a été déjà indiquée. On a alimenté extérieurement l'induit et l'inducteur, en les faisant traverser respectivement par $I = 25$ A et $i = 0,5$ A. La machine était bien calée. On coupait, à l'aide d'un interrupteur bipolaire à ressort très puissant, en même temps le courant dans les deux circuits. De cette façon, la bobine d'exploration était traversée par la variation totale du flux à la périphérie de l'induit et on avait, par conséquent, le champ résultant

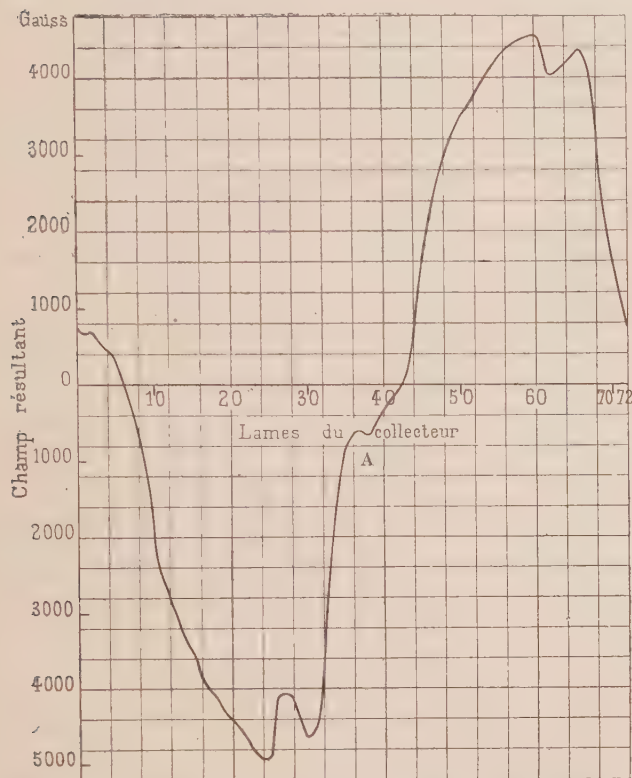


Fig. 18. — Champ résultant dans la dynamo spéciale. Courbe obtenue par la superposition des courbes des figures 16 et 17.

pièces polaires. En effet, dans le cas de la figure 14, les pièces polaires étaient traversées seulement par le flux transversal produit par l'induit, tandis que dans le dernier cas les pièces polaires sont parcourues aussi par le flux principal et, par suite, la réluctance du circuit magnétique du flux produit par l'induit est augmentée. La force magnétomotrice de ce circuit reste la même; le courant dans l'induit n'étant pas changé, le flux et le champ magnétique seront donc diminués.

Ce fait, s'il se confirme sur plusieurs machines, peut présenter une certaine importance, parce qu'il permettrait le calcul du champ qui entre dans la commutation, indépendamment de la carcasse dans laquelle l'induit tourne. Il est entendu que cette possibilité ne sera vraie qu'au moment où un commencement de saturation de la pièce polaire sera produit par le champ inducteur.

Dans les régions B et C, la courbe présente une forme différente, dont l'explication est probablement la même que celle donnée plus haut au paragraphe 13.

Cette courbe, à notre avis, représente la vraie réac-

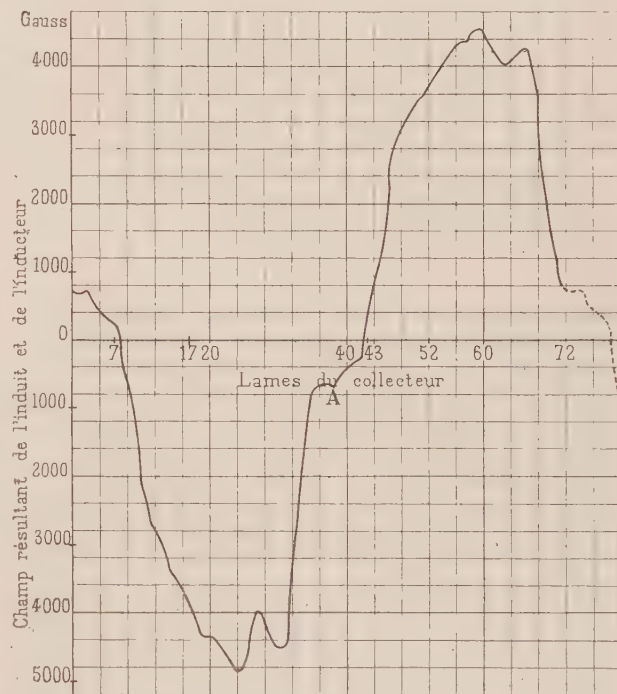


Fig. 19. — Champ résultant de l'induit et de l'inducteur dans la dynamo spéciale. $i = 0,5$ A et $I = 25$ A, coupés en même temps.

dans l'entrefer pour chaque position des balais.

La courbe ainsi relevée est représentée dans la figure 19.

Ces deux dernières courbes ont été tracées à la même échelle, pour qu'on puisse faire facilement la

comparaison. Nous les avons aussi superposées et on a constaté que la ressemblance est frappante. De plus, nous donnons le tableau suivant qui contient, pour chaque position, dans une colonne le résultat des deux

courbes superposées (fig. 17 et 16) et, à côté, les valeurs mesurées (fig. 19). Enfin, dans une troisième colonne, on a indiqué les écarts qui en résultent.

Il faut remarquer qu'aux bords polaires il existe une

TABLEAU A

NUMÉROS D'ORDRE DES LAMES	CHAMP $\mathcal{H}_v$ CALCULÉ D'APRÈS LES COURBES 16 ET 17 Gauss	CHAMP $\mathcal{H}'_v$ MESURÉ D'APRÈS LA COURBE 19 Gauss	DIFFÉRENCE	NUMÉROS D'ORDRE DES LAMES	CHAMP $\mathcal{H}_v$ CALCULÉ D'APRÈS LES COURBES 16 ET 17 Gauss	CHAMP $\mathcal{H}'_v$ MESURÉ D'APRÈS LA COURBE 19 Gauss	DIFFÉRENCE	NUMÉROS D'ORDRE DES LAMES	CHAMP $\mathcal{H}_v$ CALCULÉ D'APRÈS LES COURBES 16 ET 17 Gauss	CHAMP $\mathcal{H}'_v$ MESURÉ D'APRÈS LA COURBE 19 Gauss	DIFFÉRENCE
72	727	691	36	25	—4648	—4725	—77	48	2980	3060	—80
1	683	670	13	26	—4128	—4135	—7	49	3279	3290	—11
2	712	692	20	27	—4021	—3980	41	50	3506	3420	86
3	556	553	3	28	—4198	—4190	8	51	3604	3570	34
4	444	450	—6	29	—4442	—4415	27	52	3794	3750	44
5	302	350	—48	30	—4610	—4570	40	53	3952	3880	72
6	90	250	—140	31	—4452	—4470	—18	54	4083	4080	3
7	—235	—314	—79	32	—3530	—3505	25	55	4224	4190	34
8	—713	—825	—112	33	—2310	—2270	—60	56	4360	4340	20
9	—1158	—1380	—232	34	—1259	—1240	19	57	4477	4340	137
10	—1975	—2090	—105	35	—796	—777	19	58	4490	4445	45
11	—2445	—2600	—155	36	—627	—620	7	59	4554	4550	4
12	—2753	—2805	—52	37	—619	—625	—6	60	4552	4495	57
13	—3016	—3010	6	38	—643	—661	—18	61	4292	4340	—48
14	—3381	—3420	61	39	—521	—540	—19	62	4004	4160	—156
15	—3515	—3570	—55	40	—373	—401	—28	63	4054	4005	49
16	—3844	—3780	64	41	—191	—346	—155	64	4164	4080	84
17	—3922	—4005	—83	42	—96	—256	—160	65	4277	4190	87
18	—4088	—4135	—47	43	176	272	—96	66	4335	4290	45
19	—4313	—4315	8	44	675	804	—129	67	4125	4080	45
20	—4409	—4340	—31	45	1425	1580	—155	68	3390	3370	20
21	—4521	—4495	26	46	2123	2245	—122	69	2180	2140	40
22	—4628	—4600	28	47	2640	2815	—175	70	1542	1530	12
23	—4812	—4750	62					71	1153	885	268
24	—4870	—4875	—5					72	703	700	3

différence assez notable pour quelques points. La forme générale de ces deux courbes est la même ; dans les régions intéressantes, il n'y a pas de trop grands écarts en ce qui concerne les valeurs numériques. Sans doute, les différences qu'on trouve au bec polaire de sortie résident dans la saturation qui se produit à cet endroit et on sait qu'au moment où ce phénomène intervient la simple superposition des courbes qui représentent les champs magnétiques n'est plus admissible.

Nous insisterons sur un point qui nous semble particulièrement intéressant dans la commutation : c'est la parfaite concordance qu'on trouve pour la valeur du champ magnétique à la périphérie de l'induit pour la position des balais 38 qui correspond à la ligne neutre théorique de la machine. En vérité, dans la figure 18, la valeur du champ au point A est de 642 gauss et le point similaire de la figure 19 représente un champ dont l'intensité est de 661 gauss. Nous rappellerons, d'après le court exposé historique que nous avons fait au début de ce chapitre, que les auteurs, en général, sont d'accord sur l'hypothèse que c'est ce champ qui entre dans la commutation et, par conséquent, sa connaissance aussi exacte que possible présente un grand

intérêt au point de vue de la construction des machines à collecteur.

B. Calcul du champ qui entre dans la commutation. — 16. Nous avons vu que les auteurs, en général, sont d'accord quant à la considération du champ interpolaire pour effectuer le calcul de la force électromotrice de commutation. Le calcul de cette force électromotrice, d'après ce que nous avons fait remarquer, dès le début de cette étude, présente un gros intérêt dans la construction des machines à courant continu. En effet, dans le calcul de toute machine à collecteur, il faut se rendre compte de la qualité de la commutation, parce que le crachement des balais limite la puissance que le dynamo peut développer, sans échauffement exagéré.

Le grand intérêt de ce calcul explique le nombre de formules qu'on rencontre dans toutes les publications qui touchent aux questions de calcul des machines. Les théoriciens autant que les constructeurs ont recommandé différentes formules pour le calcul de la force électromotrice qui entre dans la commutation. En les analysant, on constate que la seule différence qui existe entre elles réside presque toujours dans la ma-

nière adoptée pour le calcul de cette valeur du champ interpolaire que nous appellerons $\mathcal{B}$.

Nous nous occuperons seulement des formules les plus connues.

R. Rüdenberg, dans le travail cité (17), donne la formule

$$\mathcal{B} = \frac{2\pi}{10} \cdot A_s \cdot \tau \cdot \frac{\lambda_0}{\delta}$$

pour le champ interpolaire.

A_s , nombre d'ampères-conducteurs par centimètre de périphérie de l'induit ;

τ , pas polaire, en centimètres ;

δ , entrefer simple ;

λ_0 , perméance magnétique dans la zone de commutation.

Rüdenberg ramène ainsi toute la difficulté du calcul de $\mathcal{B}$ à celui de la perméance λ_0 . Il emploie pour la détermination de ce facteur une méthode graphique (page 83, *loc. cit.*) basée sur la représentation du spectre magnétique. Mais cette représentation est une opération très délicate et très grossièrement approchée et nous estimons très difficile d'appliquer cette formule à cause de la difficulté à laquelle on se heurte en cherchant à déterminer λ_0 .

B.-G. Lamme (18), dans le mémoire dont nous avons parlé plus haut, donne, pour le champ dans la zone interpolaire, la formule

$$B_i = \frac{I_c W_t p}{(0,25p + 0,5)(\pi D - Pp)},$$

où I_c est le courant total qui traverse un conducteur de l'armature ;

W_t , le nombre total des spires de l'armature ;

p , le nombre des pôles ;

P , l'épanouissement de la pièce polaire ;

D , le diamètre de l'induit.

Lamme aboutit à cette formule basée surtout sur l'expérience, en admettant un certain chemin pour la ligne de force qui s'en va de la corne polaire vers la zone interpolaire.

Nous avons appliqué cette formule pour la dynamo H—100/2 spéciale, dont les constantes ont été données dans le paragraphe 10.

Pour cette machine on a

$$I_c = 12,5 \text{ A}, \quad W_t = 288 \text{ spires}, \quad p = 2 \text{ pôles},$$

$$D = 15,9 \text{ cm}, \quad P = 17,5 \text{ cm};$$

en introduisant ces valeurs dans la formule précédente, on trouve

$$B_i = \frac{12,5 \times 288 \times 2}{(0,25 \times 2 + 0,5)(\pi \times 15,9 - 17,5 \times 2)} = 480 \text{ gauss},$$

au lieu de 650 gauss environ, que nous avons obtenus par deux méthodes différentes : superposition des courbes et mesure directe. Pour cette machine, on a

donc un écart en moins de 170 gauss qui représente 35 pour 100, si on applique la formule proposée par Lamme.

Le professeur Niethammer (19) pour le même champ recommande la valeur approximative, donnée par la relation

$$B_q = \sim \gamma \frac{I_z Z_t}{4p(\tau - P)},$$

$\gamma = \sim 5$ pour les développements polaires linéaires ;

$\gamma = \sim 2,6$ pour les développements polaires circulaires ;

I_z , courant total de l'induit ;

Z_t , nombre de conducteurs ;

$2p$, nombre de pôles ;

τ , pas polaire ;

P , développement polaire.

Pour la même dynamo, on a les valeurs :

$$\gamma = 2,6, \quad I_z = 25 \text{ A}, \quad Z_t = 576 \text{ conducteurs}, \quad 2p = 2,$$

$$\tau = 25 \text{ cm}, \quad P = 17,5 \text{ cm}.$$

$$B_q = \sim 2,6 \frac{25 \times 576}{4(25 - 17,5)} = 1200 \text{ gauss},$$

donc une différence en plus de $1250 - 650 = 600$ gauss par rapport à la valeur mesurée, ce qui représente un écart de 93 pour 100.

Le professeur Karl Pichelmayer (20), en étudiant la commutation, a, lui aussi, déduit une formule pour le calcul de la force électromotrice de commutation. Naturellement, il fait entrer dans ce calcul la valeur du champ dans la zone interpolaire, pour laquelle on déduit

$$B = \zeta A,$$

où A est la densité linéaire et ζ une constante pratique, représentant le nombre de lignes de forces du flux qui traversent la bobine en commutation pour un courant d'un ampère dans l'induit et pour 1 cm de longueur de fer.

Tous les raisonnements que l'auteur fait sont déduits de la considération d'un anneau Gramme et étendus ensuite à un bobinage en tambour. Mais nous avons eu l'occasion de montrer que cette façon de faire n'est pas absolument correcte.

Dans cette formule de Pichelmayer, le coefficient ζ représente, au fond, tout le secret de la commutation. Mais l'auteur, dans le premier article paru en avril 1912, ne donne aucun renseignement quant à la valeur qu'il faut donner à cette « constante pratique ».

Quelques mois plus tard, en octobre et décembre de la même année, l'auteur donne une définition plus précise de ce coefficient ζ . Il envisage la décomposition des forces électromotrices telle que nous l'avons exposée au paragraphe 3 et par suite le coefficient ζ se trouve décomposé en trois autres

$$\zeta_k = \zeta_s + \zeta_{qs} + V_w \zeta_{ql},$$

correspondant aux forces électromotrices affectées des mêmes indices. De ces trois parties, la plus importante comme ordre de grandeur est ζ_s pour lequel l'auteur recommande la formule

$$\zeta_s = 8 + 1,6 \frac{L_s}{L_e},$$

où L_s est la longueur de la spire en dehors du fer et L_e , la longueur de cette même spire dans le fer.

La valeur de ζ_s sera influencée par les éléments suivants :

- 1° Rapport de la longueur de l'induit à l'arc polaire ;
- 2° Largeur des charbons ;
- 3° Amortissement par les corps métalliques.

L'auteur reconnaît lui-même que la valeur de ζ est très difficile à calculer d'une manière exacte et il recourt aux essais directs, en faisant des mesures en courant alternatif à la fréquence d'environ 50 p. s. Il nous semble utile de mentionner ce résultat que les différences trouvées pour les valeurs de ce coefficient en faisant les mesures, l'induit dans sa carcasse ou sorti complètement dans l'air, ne donnent comme écart entre elles que 10 à 15 pour 100, les valeurs plus grandes se rapportant au cas où l'induit est logé dans la carcasse. Ce résultat est tout à fait en accord avec celui exposé plus haut.

Nous avons tâché d'appliquer les formules ci-dessus pour la dynamo spéciale ; on a

$$L_s = 27 \text{ cm.}, \quad L_e = 2 \times 15,5 = 31 \text{ cm.},$$

$$A = 144 \text{ ampères-fils par centimètre},$$

$$\text{donc} \quad \zeta_s = 8 + 1,6 \frac{27}{31} = 8 + 1,39 = 9,39$$

et la valeur du champ B sera

$$B = \zeta_s A = 9,39 \times 144 = 1\,370 \text{ gauss},$$

valeur beaucoup plus forte que celle déduite expérimentalement ; la différence est de 1370 — 650 = 720 gauss, ou 111 pour 100 en plus.

Rezelman⁽²¹⁾, plus récemment (p. 135), s'est arrêté, pour la valeur du champ, à la formule

$$B_q = 1,25 \cdot A_s \cdot \frac{\tau}{\frac{\pi}{2} \delta_q},$$

où A_s est le nombre d'ampères-fils par centimètre ;
 τ , le pas polaire ;

$\delta_q = \frac{1}{2} (1 - \alpha) \tau$, α étant le rapport entre le développement polaire et le pas polaire ; donc la formule devient

$$B_q = 1,25 A_s \frac{\tau}{\frac{\pi}{2} \times \frac{1}{2} (1 - \alpha) \tau} = 5 A_s \frac{1}{\pi (1 - \alpha)}.$$

Pour la dynamo spéciale, on a

$$A_s = 144 \text{ ampères-fils par centimètre et } \alpha = 0,7 ;$$

donc

$$B_q = 5 \times 144 \frac{1}{\pi (1 - 0,7)} = 765 \text{ gauss},$$

valeur plus rapprochée de la valeur réelle, avec laquelle elle ne présente qu'un écart de 105 gauss, soit 17,5 pour 100.

M. Mauduit, dans son cours professé à l'Institut électrotechnique de Nancy, recommande, pour calculer la valeur du même champ, une formule, qui a un caractère empirique.

Elle peut être mise sous la forme

$$\mathcal{B}_\gamma = \xi \varpi x,$$

où ξ représente le flux s'échappant de 1 cm² de surface périphérique pour un ampère-tour agissant sur le tube total de force correspondant ;

ϖ , le pas polaire ;

x , le nombre d'ampères-fils par centimètre.

C'est ξ qui présente toute la difficulté du phénomène de commutation. Pour le calculer, M. Mauduit estime que ce facteur varie en rapport inverse avec la distance interpolaire et qu'il est d'autant plus important que le pas polaire est plus grand.

Pour les dynamos modernes, qui ont un rapport β d'environ 2/3, l'auteur recommande $\xi = 0,15$.

Mais en tenant compte des éléments de construction, pour les dynamos qui ont $\beta \neq 2/3$, l'auteur recommande la formule

$$\xi = \frac{0,05}{1 - \beta},$$

β étant le rapport entre le développement polaire et le pas polaire.

Dans le cas qui nous intéresse, on a $\beta = 0,7$,
 $\varpi = 25 \text{ cm}$, $x = 144 \text{ ampères-fils par centimètre}$; donc

$$\xi = \frac{0,05}{1 - 0,7} = 0,167$$

et

$$\mathcal{B}_\gamma = 0,167 \times 25 \times 144 = 600 \text{ gauss}.$$

Par rapport à la valeur calculée, cette formule présente une différence en moins de 50 gauss ou 8,2 pour 100.

Un autre auteur, M. Guéry⁽²²⁾, en discutant la formule proposée par M. Mauduit sur le critérium d'une bonne commutation, a été amené à considérer le champ dont nous nous occupons. L'auteur recommande une formule extrêmement simple

$$\mathcal{B}_1 = b_1 K,$$

où K est le nombre d'ampères-fils par centimètre de

développement périphérique et $b_1 = 1,2$, mais, malheureusement, il ne faut se faire aucune illusion sur l'emploi d'une telle formule, malgré sa simplicité.

L'auteur justifie cette valeur de b_1 en supposant que les lignes de forces, joignant, extérieurement à l'induit, supposé développé, deux zones de commutation ont la forme de demi-circonférences et en supprimant le tiers de leur longueur pour tenir compte de la partie qui traverse le fer inducteur.

Il nous semble que cette manière de raisonner est incorrecte parce que rien ne prouve que les lignes de forces aient la forme de demi-circonférences; ensuite, la réduction faite pour tenir compte de la présence du fer ne peut pas être fixée à priori parce qu'elle dépend de l'état particulier de saturation qu'on rencontre dans chaque machine et on sait que rien n'est plus difficile à prévoir que la valeur de la perméabilité et de la réluctance pour un pareil circuit.

L'auteur ajoute, d'ailleurs, que cette valeur b_1 est très peu influencée par le nombre de pôles, mais il admet cependant qu'elle s'accroît, mais très peu, en même temps que le nombre de pôles.

Dans ces conditions, il n'est pas étonnant, que pour la machine que nous avons étudiée, on trouve

$$\mathcal{B}_1 = b_1 K = 1,2 \times 144 = 173 \text{ gauss,}$$

donc une différence en moins de $650 - 173 = 477$ gauss, soit 276 pour 100.

Tout récemment, en 1920, Oelschläger ⁽²³⁾, en étudiant le calcul des pôles auxiliaires, emploie dans la formule de la force électromotrice de commutation la relation suivante qui donne le champ transversal de l'armature

$$B_{qa} = A_s \cdot \lambda_{qa}$$

avec

$$\lambda_{qa} = \frac{1,8}{1 - \frac{t_p}{P}}$$

où A_s est le nombre d'ampères-fils par centimètre;

P , le développement polaire;

t_p , le pas polaire.

Pour la dynamo $H-100/2$, on a

$$A_s = 144 \text{ ampères-fils par centimètre,}$$

$$P = 25 \text{ cm., } t_p = 17,5 \text{ cm.,}$$

$$B_{qa} = 144 \frac{1,8}{1 - \frac{17,5}{25}} = 865 \text{ gauss,}$$

qui représente une différence de 215 gauss, ou 33 pour 100.

En exposant toutes ces formules, provenant des auteurs les plus connus dans l'étude de la commutation, nous avons poursuivi un seul but, celui de montrer combien sont illusoirs tous ces calculs.

Notre impression est qu'un élément qui doit jouer un rôle très important dans la valeur de ce champ dans la zone interpolaire est complètement ignoré. Cet élément est de nature constructive et tient aux qualités magnétiques des tôles employées pour la construction de l'armature d'induit. Généralement, on le néglige parce que la réluctance du circuit fer est négligeable devant celle de l'air. Cette affirmation n'est qu'en partie exacte. En effet, on a deux circuits fer, un de l'induit et le fer de la pièce polaire; les deux par leur présence peuvent modifier notablement la réluctance totale du circuit considéré, surtout dans le cas d'une légère saturation.

Une étude, qui tient compte de ces éléments, est inabordable dans un laboratoire d'université parce qu'il faut que l'on ait à sa disposition différents types de machines et de différents modèles, faute de quoi tout essai est illusoire. Dans cette direction, les maisons de construction seules peuvent disposer du matériel nécessaire pour de pareilles études. Sur la machine que nous avons étudiée, on ne peut faire intervenir aucun calcul de réluctance du circuit fer, parce qu'on ne connaît que des courbes moyennes pour la variation de la perméabilité. C'est seulement en poursuivant des recherches méthodiques que l'on pourra arriver à débrouiller cette difficile question. Mais, la base de toute investigation dans ce domaine doit s'appuyer sur l'expérience qui, seule, est en mesure d'éclaircir la question. Les formules empiriques qu'on a l'habitude d'employer dans ce phénomène ne pourront pas fournir la rigueur exigée dans les dynamos modernes, surtout pour les questions de surcharge.

Appliquées à une machine déterminée, ces différentes formules ne donnent des résultats comparables que dans des cas exceptionnels. En particulier, l'emploi de deux d'entre elles ne conduit à la même valeur du champ que pour une valeur unique du pas polaire. Dans ces conditions, on voit très bien la difficulté que ce calcul comporte et cette difficulté est encore mise en relief par les calculs que nous avons donnés plus haut pour la dynamo spéciale.

C. Champs dynamiques. — 17. L'étude que nous avons faite jusqu'à présent est relative aux champs statiques, c'est-à-dire aux cas où la dynamo n'est pas en mouvement.

Le cas réel, tel qu'il se présente dans la pratique, est au contraire celui de la dynamo en rotation.

Pour étudier, dans ce cas, la distribution du champ que nous allons dénommer, d'après le terme employé par M. Mauduit, l'allure dynamique du champ, on ne peut plus se contenter de la même méthode d'exploration avec une bobine et un galvanomètre balistique. Il faut relever la force électromotrice qui prend naissance dans une section.

On y arrive au moyen d'un oscillographe. Nous en avons utilisé un, du type Blondel bifilaire, à trois équipes, qui appartient au laboratoire d'Electrotechnique de l'Université de Nancy. La description de

l'appareil se trouve dans le cours de M. Mauduit, cité dès le début.

Pour étudier la force électromotrice produite dans une section, la dynamo a été munie de trois bagues auxiliaires (fig. 20) a, b, c; a, étant celle qui est la plus près de l'induit. Ces bagues sont calées sur le collec-

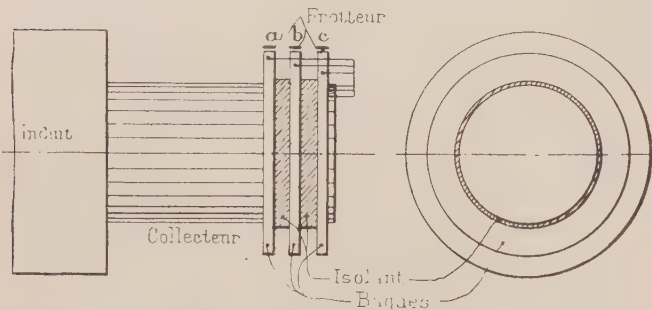


Fig. 20. — Disposition des bagues auxiliaires pour étudier la force électromotrice produite dans une section de la dynamo.

teur dont elles sont bien isolées. Trois petits frotteurs fixés sur le porte-balai, prolongé dans ce but, assurent la prise du courant. Les connexions entre ces trois bagues et le bobinage de l'induit sont faites d'après le schéma de la figure 21. Les extrémités des bobines sont connectées aux lames du collecteur 1, 2, 3... Sur les

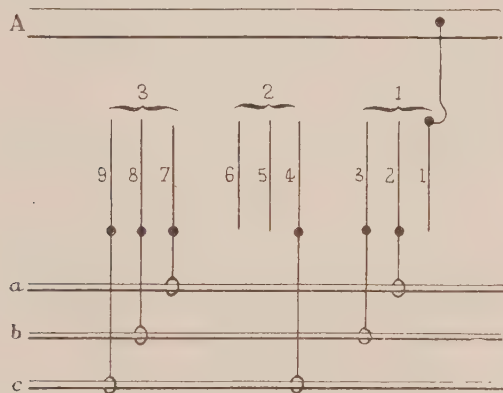


Fig. 21. — Schéma des connexions des bagues auxiliaires.

lames 2, 3, 4, 7, 8 et 9 sont disposées de petites saillies qui permettent, par l'intermédiaire de barrettes, d'assurer le passage du courant vers les bagues. De cette façon, on peut avoir en même temps trois sections, en utilisant aussi la bague A connectée à la lame 1. En outre, on peut étudier n'importe laquelle des trois sections qui se trouvent dans une même encoche.

Pour faire une comparaison entre les différentes distributions des champs que nous avons considérés jusqu'à présent à l'état statique, il faudra, autant que possible, se placer dans les mêmes conditions, ou, tout au moins, dans des conditions analogues pour les champs dynamiques.

18. Nous avons commencé par l'examen du champ produit par la réaction de l'induit. On a alimenté l'induit extérieurement par un courant, dont l'intensité a été gardée constante pendant l'opération et égale à 18,5 A.

On a relevé la courbe qui représente la différence de potentiel de la section comprise entre les bagues A et a. L'induit était entraîné par un moteur à courant continu à une vitesse constante de 1070 t : mn. Dans ces conditions, on a relevé l'oscillogramme 245 (fig. 22). L'échelle de cet oscillogramme est de 78,5 millivolts par millimètre.

Il faut maintenant rapprocher cette courbe de celle de la figure 14. L'analogie est assez frappante si on tient compte des échelles auxquelles ces deux courbes sont tracées. Comme allure, c'est bien la même, en particulier, le renforcement trouvé dans la zone de com-

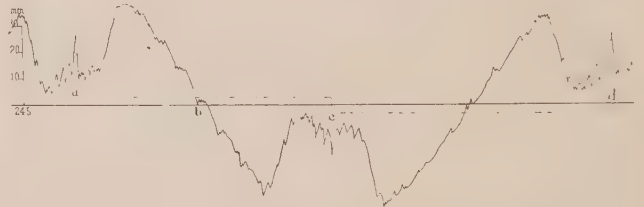


Fig. 22. — Oscillogramme de la tension de section entre les bagues A et a. Champ dynamique de la réaction de l'induit de la dynamo spéciale H-100/2; $I = 18,5$ A, $n = 1070$ t : mn, inducteur ouvert.

mutation est très nettement visible en considérant la valeur moyenne dans la zone interpolaire.

Dans l'oscillogramme, on voit une dyssymétrie, qui est plus nette pour les cornes polaires et pour les portions de la courbe qui sont d'un côté et de l'autre de la pointe de commutation. Théoriquement, cette dyssymétrie ne devrait pas exister, parce que l'induit est alimenté extérieurement. Elle provient de ce que l'oscillographe mesure la tension dans la section, c'est-à-dire la force électromotrice développée et diminuée de la chute de tension rJ , due à la résistance r de la section. Comme conséquence, la courbe est relevée dans la portion ac et abaissée en cd. Pour la ramener à sa vraie situation, il faut considérer l'axe de zéro, tel qu'il a été tracé en pointillé. L'axe a été déplacé d'une quantité correspondant à la chute ohmique qui est

$$rJ = 0,025 \times \frac{18,5}{2} = 0,23 \text{ volt,}$$

qui, à l'échelle indiquée plus haut, représente sur le cliché

$$\frac{0,23}{0,0785} = 2,94 \text{ mm.}$$

Quant aux valeurs numériques de l'induction en différents points, il faut les considérer par rapport aux nouveaux axes.

D'abord, on va calculer l'induction correspondant à 1 v, la dynamo ayant une vitesse de 1070 t : mn.

Nous aurons

$$\mathcal{B}_1 = \frac{60 \times 10^8}{1070 \times 8 \times 15,5 \times \pi \times 15,9} = 905 \text{ gauss,}$$

en considérant 8 conducteurs par bobine de 4 spires.

Pour les cornes polaires, on mesure sur le cliché original une valeur moyenne de 34 mm, qui représente 2,66 v. L'induction correspondante, d'après le calcul précédent, est de 2410 gauss. Cette valeur correspond à un courant $I = 18,5$ A dans l'induit. La mesure au balistique a été faite sous 25 A, donc il faut ramener la valeur calculée plus haut pour l'induction à celle qui correspond au même courant. Si on admet que l'induction varie proportionnellement au courant qui traverse les bobines de l'induit, on trouve 3250 gauss. D'autre part, la valeur moyenne pour l'induction des deux cornes polaires, mesurée au balistique est de 2910 gauss. Il résulte un écart de 11,5 pour 100 qui n'est pas exagéré, surtout quand on pense que les mesures quantitatives à l'oscillographe sont assez grossières.

On va calculer maintenant l'induction à la corne polaire, en utilisant la formule indiquée par M. Mauduit dans son cours

$$\mathcal{B}_c = \frac{4\pi}{10} \times \frac{\alpha b}{2z},$$

où α est le nombre d'ampères-fils par centimètre de périmétrie de l'induit ;

b , l'épanouissement de la pièce polaire ;

z , l'entrefer à la corne polaire.

En introduisant les valeurs respectives pour la dynamo spéciale, on a

$$\alpha = 144 \text{ ampères-fils par centimètre,}$$

$$b = 17,5 \text{ cm., } z = 0,5 \text{ cm. ;}$$

donc

$$\mathcal{B}_c = \frac{4\pi}{10} \times \frac{144 \times 17,5}{2 \times 0,5} = 3150 \text{ gauss.}$$

valeur comprise entre les mesures faites avec le balistique et avec l'oscillographe.

Ce calcul montre que la réluctance du circuit dans le fer de l'induit et de la pièce polaire est négligeable. Mais il faut observer, d'après ce que nous avons dit auparavant, que cette hypothèse n'est plus vérifiée du moment que l'inducteur est complètement excité, parce que le phénomène de la saturation intervient.

En continuant la comparaison entre les deux courbes, on va examiner deux valeurs plus importantes : la valeur moyenne de deux minima et la valeur du renforcement qui se trouve entre ces minima.

Pour la valeur moyenne des minima, on trouve sur l'oscillogramme

$$\frac{6,4 + 6}{2} = 6,2 \text{ mm.}$$

à quoi correspond 0,487 v. Le champ qu'on trouve est 440 gauss. En admettant toujours la proportionnalité pour les champs, on a, pour un courant de 25 A,

$$440 \times \frac{25}{18,5} = 595 \text{ gauss.}$$

Dans la courbe relevée à l'aide du balistique, on obtient comme valeur moyenne 550 gauss, soit un écart de 7,5 pour 100 entre les valeurs fournies par ces deux moyens.

Pour la valeur du renforcement, particulièrement intéressante pour l'étude de la commutation, il est très difficile de faire un calcul. La grosse difficulté provient de l'existence des pointes de commutation dues aux forces électromotrices qui prennent naissance dans la bobine court-circuitée sous l'action de la variation du champ. Ensuite, il ne faut pas négliger la circulation du courant de court-circuit, qui produit une différence de potentiel qu'on mesure aussi à l'oscillographe.

Pour avoir une idée de la valeur enregistrée sur l'oscillogramme dans cette zone, on a pris la moyenne de la courbe, en laissant de côté les pointes. Dans ces conditions, on mesure sur l'oscillogramme 8 mm, ce qui représente 0,627 v. On a vu qu'à chaque volt correspondent 905 gauss ; donc, pour cette valeur de la tension, nous aurons 567 gauss. La photographie a été relevée avec un courant de 18,5 A dans l'induit ; pour avoir la même valeur que dans le cas où nous avons mesuré ce renforcement avec le balistique sous 25 A dans l'induit, il faut avoir

$$567 \times \frac{25}{18,5} = 765 \text{ gauss.}$$

Comme valeur mesurée par le balistique, on a trouvé 786 gauss, soit une valeur très approchée, l'écart n'étant que de 30 pour 100. Evidemment cette précision ne se produira pas dans tous les cas et c'est plutôt un hasard que, dans ce cas, les valeurs soient si concordantes, mais le fait important est que la valeur moyenne de la force électromotrice produite dans la zone de commutation donne une idée de l'ordre de grandeur du champ qui se trouve dans cette zone.

19. Passons à l'analyse d'une courbe qui représente la tension à vide de la dynamo. Nous avons relevé l'oscillogramme représenté dans la figure 23 (cliché 277).

La tension de la dynamo était 155 v pour la vitesse de 1070 t : mn.

La constante de l'oscillogramme est 192,5 millivolts par millimètre.

Cette courbe représentant la tension à vide montre en même temps, à une échelle différente, la distribution du champ de l'inducteur tout autour de l'induit. Il faut donc rapprocher cette courbe de celle de la figure 16 relevée avec le balistique.

La forme générale est bien la même ; au premier coup d'œil, il semble que la courbe relevée au balistique

présente sous les pièces polaires des valeurs plus fortes que dans les régions voisines; mais c'est seulement une impression produite par la différence d'échelle. En comparant les valeurs numériques, ce que nous allons faire tout à l'heure, on trouve le même rapport.

Pour faire la comparaison des valeurs, il faut considérer dans l'oscillogramme la valeur moyenne de la force électromotrice induite dans une section. Pour y

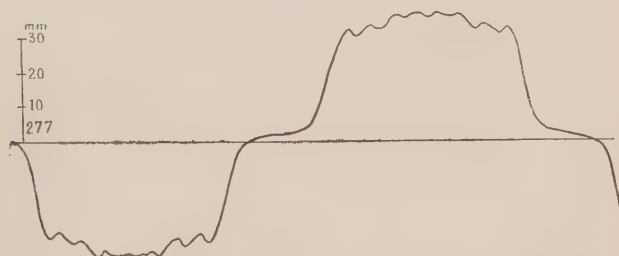


Fig. 23. — Oscillogramme de la tension de section entre les bagues A et a. Champ de l'inducteur de la dynamo spéciale, $H=100/2$, à vide, $E=155$ v, $n=1070$ t : mn.

arriver, on a pris au planimètre la surface d'une période entière et on en a déduit la valeur cherchée. Sur la figure 23, nous avons] trouvé pour l'ordonnée moyenne 23 mm, ce qui donne 4,43 v. A raison de 905 gauss par volt, on a 4010 gauss comme induction moyenne, au lieu de 4300 gauss mesurés au balistique, donc un écart de 7 pour 100, qui est assez notable, mais point exagéré.

On peut déduire la valeur du flux moyen, en utilisant la formule classique qui donne la force électromotrice,

$$\Phi = \frac{E \times 60 \times 10^8}{nN} = \frac{162 \times 60 \times 10^8}{576 \times 1070} \\ = 1,572 \times 10^6 \text{ maxwells}$$

et

$$\mathcal{B}_c = \frac{1,572 \times 10^6}{15,5 \times 25} = 4050 \text{ gauss,}$$

donc une valeur comprise entre les deux mesures indiquées précédemment. On voit que la concordance est assez bonne, entre le calcul, d'une part, et les mesures tant au balistique qu'à l'oscillographe, d'autre part.

Connaissant la force électromotrice engendrée en chaque bobine, on peut déduire la force électromotrice totale de la machine. L'induit comprend 36 bobines en série pour chaque pôle; donc il faut que la force électromotrice totale soit

$$36 \times 4,43 = 159 \text{ v,}$$

valeur, en parfaite concordance avec la lecture de 155 v indiquée plus haut et faite avec un voltmètre habituel de la Compagnie pour la Fabrication des Compteurs et Matériel d'Usines à gaz.

D'autre part, d'après ce que nous disions plus haut, les rapports entre les ordonnées maxima sous la pièce

polaire et les ordonnées moyennes des régions voisines ont les mêmes valeurs. En effet, pour la courbe relevée au balistique, le rapport donne 1,18 et pour celle qui a été relevée à l'oscillographe, 1,155, valeurs très voisines.

20. Après avoir analysé l'allure dynamique des champs de réaction et de l'inducteur, il reste à étudier, pour garder le principe employé dans le cas des champs statiques, le champ résultant de la dynamo, c'est-à-dire le champ de la dynamo en charge.

A cet effet, on a entraîné la dynamo à la vitesse de 1070 t : mn; on l'a excitée indépendamment de façon à avoir une tension à vide de 154 v. Le courant que la dynamo débitait avait sa valeur maximum de 25 A; à ce moment, la différence de potentiel aux bornes était $V_{25} = 128$ v.

Dans ces conditions, on a relevé les oscillogrammes représentés en figure 24 (clichés 248, 249 et 250), chaque oscillogramme correspond à une des trois sections qui se trouvent dans la même encoche.

La constante de l'oscillogramme est 168,5 millivolts par millimètre.

Au point de vue qualitatif, en suivant toujours la forme générale, la courbe présente une très grande analogie avec celle qui a été relevée au balistique et représentée en figure 19. A première vue, on est tenté de croire que sous la pièce polaire les courbes sont différentes; mais ce n'est qu'une impression due aux échelles auxquelles les courbes ont été tracées. En effet, si on calcule le rapport entre la moyenne des valeurs maxima et la valeur minimum que la bosse présente, on trouve pour la courbe donnée par le balistique 1,18, tandis que, pour l'autre, c'est 1,14; donc, valeurs à peu près égales.

Dans la zone de commutation, si on suit la valeur moyenne de la courbe et avec les mêmes restrictions que plus haut, on retrouve la forme que le balistique indique en A sur la figure 19. Le fait est particulièrement intéressant parce qu'on constate pour les dynamos en marche exactement la même forme qu'au repos.

Quant aux valeurs numériques, les ressemblances ne sont pas moins intéressantes.

Premièrement, la tension totale de la dynamo, d'après la force électromotrice engendrée dans chaque bobine, est

$$36 \times 3,38 = 122 \text{ volts,}$$

soit un écart de 6 v ou 5 pour 100 entre cette valeur et la lecture au voltmètre.

En planimétrant une période entière du cliché 250, on trouve, comme ordonnée moyenne, 20 mm; avec la constante indiquée plus haut, cela représente 3,38 v et à raison de 905 gauss par volt, il résulte que l'induction moyenne monte à $3,38 \times 905 = 3060$ gauss. La courbe relevée au balistique donne comme ordonnée moyenne 2820 gauss, donc un écart de 8,5 pour 100. Si on compare avec la courbe représentée en figure 18, déduite de la composition de deux autres courbes, comme il a été expliquée au paragraphe 15, on trouve à peu près le même écart, cependant un peu diminué.

Si on calcule maintenant le flux moyen d'après la formule qui donne la force électromotrice, on a

$$\Phi = \frac{122 \times 60 \times 10^8}{576 \times 1070} = 1,19 \times 10^6 \text{ maxwells}$$

et

$$\mathcal{B}_c = \frac{1,19 \times 10^6}{15,5 \times 25} = 3080 \text{ gauss,}$$

donc une valeur très approchée de celle qu'a donnée l'oscillographe, mais un peu plus écartée de la valeur déduite au balistique; par rapport à cette dernière la différence est de 9 pour 100.

En ce qui concerne les valeurs maxima sur les deux courbes, on trouve : pour l'oscillogramme, il faut

prendre la valeur moyenne de deux maxima, un positif et l'autre négatif, pour éliminer de cette façon la déformation que la courbe subit à la suite de la chute ohmique rJ , comme il a été expliqué plus haut et qui tantôt s'ajoute et tantôt se retranche de la vraie valeur. Donc, nous aurons comme ordonnée moyenne

$$\frac{37 + 29}{2} = 33 \text{ mm.,}$$

qui correspondent à 5,56 v et par conséquent à 5030 gauss.

Pour la courbe prise au balistique, en prenant toujours la moyenne de deux maxima, on trouve 4712 gauss. Les valeurs absolues présentent une différence, mais

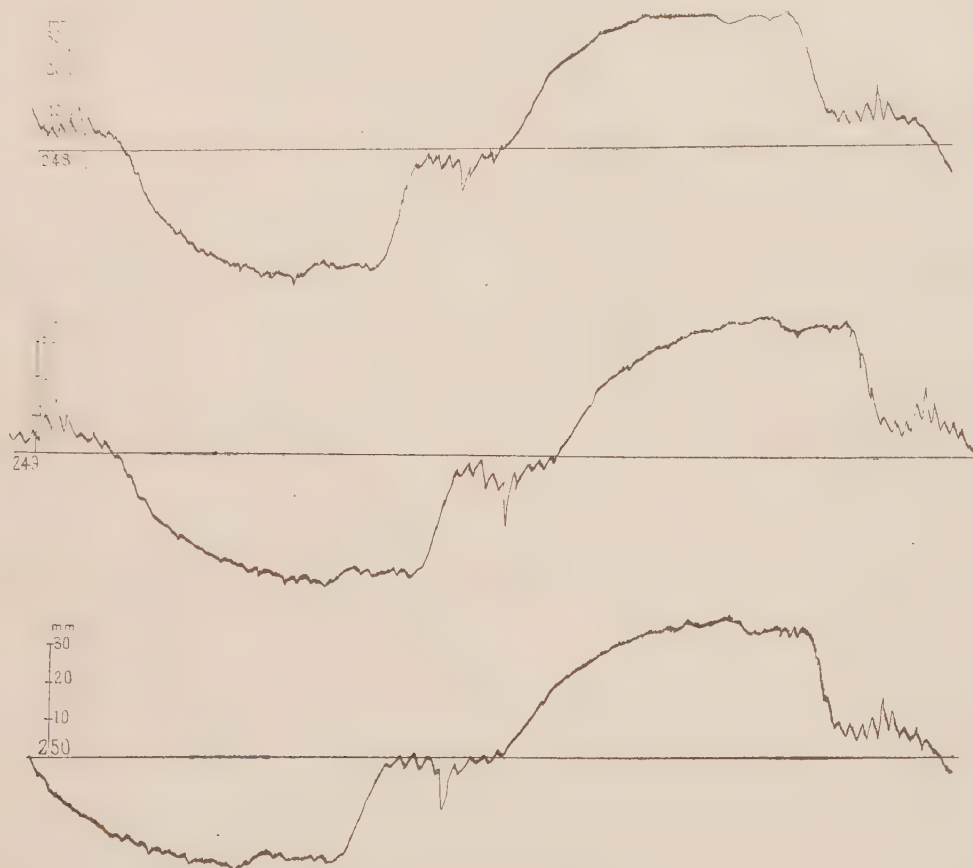


Fig. 24. — Champ résultant de la dynamo H-100/2 en charge; $E_0 = 154 \text{ v}$, $I = 25 \text{ A}$, $V_{25} = 128 \text{ v}$, $n \approx 1070 \text{ t : mn.}$
a (cliché 248), tension de section entre les bagues A et a; b (cliché 249), tension de section entre les bagues a et b;
c (cliché 250), tension de section entre les bagues b et c.

celle-ci, évaluée en centièmes, se réduit à 6,5, valeur du même ordre de grandeur que dans toute cette étude.

On passe maintenant à la question la plus difficile, celle d'évaluer le champ de la zone interpolaire, la dynamo étant en charge. En effet, dans ce cas, toutes les complications occasionnées par la commutation, champ de l'induit dans la zone interpolaire, courant de circulation, etc., entrent en jeu. Pour avoir une idée

de l'ordre de grandeur du champ dans cette zone, tel qu'il est donné par le relevé oscillographique, nous avons laissé de côté la pointe qu'on rencontre dans la zone de commutation, en supposant que le champ lui-même produit seulement la force électromotrice moyenne qu'on reconnaît dans cette zone. En suivant cette hypothèse, nous relevons sur le cliché original une ordonnée moyenne de 4,5 mm. Cette ordonnée a été

obtenue en faisant la moyenne arithmétique des ordonnées de deux zones consécutives de commutation pour les mêmes raisons que plus haut.

A cette valeur, correspond une tension de 0,757 v et donc, un champ de 685 gauss. On se rappelle que, dans la mesure balistique, on avait trouvé 661 gauss, donc une valeur extrêmement approchée, quand on pense à tous les phénomènes qui entrent en jeu dans ce cas. L'écart n'est que de 3,5 pour 100 entre les valeurs trouvées par ces deux moyens bien différents.

On constate que, même en charge, les valeurs trouvées pour les champs dynamiques concordent très bien avec celles qui ont été mesurées au repos, c'est-à-dire avec les champs statiques.

21. Sur cette courbe, on observe deux différences essentielles par rapport à celle qui a été relevée sur la même dynamo en marche à vide.

La première, c'est la présence de la région de la commutation qui est due à l'existence d'un courant circulant dans les enroulements de l'armature et provoquant le champ de réaction.

Deuxièmement, on voit que la courbe ne présente plus une forme presque droite sous la pièce polaire. Au contraire, il est très visible qu'elle s'écarte du zéro sous un angle beaucoup plus petit que dans la courbe à vide (angle formé entre l'axe du zéro, pris en sens positif de gauche à droite, et la tangente à la courbe pour le point d'ordonnée nulle) et, à peine vers la moitié de la demi-période, elle atteint la valeur maximum. Cette déformation de la courbe constitue le phénomène connu sous le nom de distorsion du champ d'une dynamo.

On va essayer d'évaluer l'importance de la distorsion dans cette machine.

Au préalable, il faut rappeler que la courbe est déplacée par rapport à l'axe du zéro vers le haut d'une quantité égale à la chute ohmique dans la section ; celle-ci a comme valeur

$$rJ = 0,025 \times \frac{25}{2} = 0,312 \text{ volts,}$$

qui correspond sur le cliché à une distance de

$$\frac{0,312}{0,1685} = 1,85 \text{ mm,}$$

dont il faut tenir compte. (Dans les calculs précédents relatifs à la même courbe, on a toujours pris la moyenne des ordonnées positive et négative, ce qui écartait automatiquement cette erreur).

Sur le cliché, on détermine les points qui correspondent aux inductions des cornes polaires, chanfrein non compris, et on mesure les ordonnées respectives 32 et 27 mm, déduction faite de la chute ohmique 1,85 mm. La différence d'induction entre les cornes polaires est de 5 mm, ou 0,842 v ; la différence, exprimée en gauss, sera de 759. D'autre part, la moyenne

de ces deux valeurs est de $\frac{32 + 27}{2} = 29,5$ mm qui correspond à 4,97 v ou à 4500 gauss.

Le rapport entre la différence des deux cornes polaires et la valeur moyenne des mêmes points est de

$$\frac{759}{4500} = 16,8 \text{ pour 100.}$$

ou 8,4 pour 100 en dessous et en dessus de la valeur moyenne.

La distorsion est assez modérée, surtout quand on pense que l'entrefer n'a que 0,3 cm comme longueur. Ce fait appuie la supposition que nous avons faite à une autre occasion que la dynamo, en marche normale, présente des circuits saturés dans la pièce polaire et les dents. Certainement, la présence de ce phénomène de saturation intervient en diminuant la distorsion qui autrement serait plus forte à cause du faible entrefer.

22. Nous avons fait fonctionner la même machine en moteur.

Sur la figure 25, on peut voir deux oscillogrammes qui se réfèrent, dans l'ordre alphabétique des indices, à la marche en dynamo et en moteur.

Nous examinerons ces courbes aux points de vue qualitatif, d'abord, et, ensuite, quantitatif.

Au point de vue qualitatif, comme forme, les courbes présentent des différences importantes.

Mais, avant d'en parler, il faut dire que tous les clichés contenus dans ce travail, sauf indication spéciale, doivent être lus de gauche à droite ; l'origine est d'ailleurs facile à reconnaître parce qu'elle se trouve du côté du numéro d'ordre.

Pour la marche en génératrice (cliché 278) nous avons examiné ci-dessus la distorsion en détail ; nous n'y reviendrons plus.

Pour la marche en moteur (cliché 288), la machine ayant le même sens de rotation qu'en génératrice, c'est-à-dire la même polarité du système inducteur et le courant inversé dans l'induit, on observe que la distorsion présente une inversion par rapport à celle de la dynamo. Dans le cas de la réceptrice, d'après les explications bien connues, il se produit un renforcement de l'induction à la corne polaire avant où la réaction de l'induit est magnétisante et un affaiblissement à la corne polaire arrière où la même réaction agit en diminuant l'induction principale.

En ce qui concerne les valeurs numériques, on trouve :

Pour le cliché 278, marche en dynamo, la constante est de 183 millimètres par volt ;

L'excitation était indépendante ; la tension de la dynamo, 155 v et le courant total, 17,5 A.

En planimétrant, on trouve, comme ordonnée moyenne, 20,4 mm, qui représentent 3,73 v, ou 3380 gauss.

Comme les oscillogrammes n'ont pas été relevés à la même différence de potentiel entre les balais, on

prend une valeur moyenne de 120 v et on réduit toutes les valeurs à cette différence de potentiel, en supposant toujours l'existence de la proportionnalité entre les inductions et les tensions.

D'autre part, pour les intensités, on prend comme valeur moyenne 17,5 A et on admet que le champ dans l'intervalle interpolaire varie proportionnellement avec le courant qui traverse l'enroulement de l'armature.

Dans ces conditions, l'induction moyenne devient

$$3380 \times \frac{120}{155} = 2620 \text{ gauss.}$$

La force électromotrice induite dans chaque bobine sera

$$3,73 \times \frac{120}{155} = 2,88 \text{ v}$$

et, pour la force électromotrice totale,

$$2,88 \times 36 = 104 \text{ v;}$$

soit une chute de tension de $120 - 104 = 16 \text{ v}$, ou 15 pour 100.

En calculant le flux d'après les formules classiques,

pour la dynamo en charge dont la tension est 104 v, on trouve

$$\Phi = \frac{104 \times 60 \times 10^8}{576 \times 1070} = 10^6 \text{ maxwells}$$

et

$$\alpha_c = \frac{10^6}{15,5 \times 25} = 2570 \text{ gauss,}$$

à peu près la même valeur que celle trouvée plus haut, en admettant la proportionnalité entre les tensions et les inductions.

Pour la distorsion, en conduisant les calculs de la même manière que précédemment, on trouve comme différence entre les ordonnées de deux cornes polaires 4,5 mm et la moyenne arithmétique pour ces deux points est 27,7 mm ; le rapport, sans passer aux inductions qui n'en changent pas la valeur, est de $\frac{4,5}{27,7} = 16,2$

pour 100, donc 8,1 pour 100 d'un côté et de l'autre. Dans ce cas, avec la dynamo chargée à 2/3 de sa puissance normale, on retrouve donc à peu près la même valeur pour la distorsion qu'en charge normale.

Dans la zone de commutation, en prenant la moyenne d'une valeur positive et d'une valeur négative, pour



Fig. 25. — Champ résultant de la dynamo spéciale H-100/2 en charge; a (cliché 278), marche en génératrice, $E_0 = 155 \text{ v}$, $I = 17,5 \text{ A}$, $n = 1070 \text{ t : mn}$; b (cliché 288) marche en moteur, $U = 120 \text{ v}$, $I = 16 \text{ A}$, $n = 1070 \text{ t : mn}$. Tension de section entre les bagues A et a.

éliminer l'erreur due à la chute ohmique, on mesure une ordonnée moyenne de 3,5 mm qui correspond à 0,55 v et 495 gauss comme valeur de l'induction dans cette région. Dans le cas précédent, pour 25 A, on a eu 685 gauss. Si la proportionnalité existait, pour 17,5 A, on aurait dû obtenir $685 \times \frac{17,5}{25} = 480 \text{ gauss}$, valeur assez approchée de la mesure directe.

Le cliché 288 se rapporte à la même machine ali-

mentée en moteur sous une différence de potentiel de 120 v, la vitesse est de 1070 t : mn, le courant 16 A.

La constante de l'oscillogramme est 137 mv par millimètre.

En planimétrant la surface d'une période entière, on trouve comme ordonnée moyenne 21,9 mm qui donne 3 v ou 2720 gauss comme induction moyenne.

La tension totale sera

$$3 \times 36 = 108 \text{ v.}$$

On obtient la chute de tension en effectuant la différence $120 - 108,7 = 11,3$ v. Mais le courant étant de 16 A au lieu de 17,5, il faut augmenter la chute de tension dans ce rapport soit $12 \times \frac{17,5}{16} = 13,1$, qui représente $\frac{109,1}{120} = 11$ pour 100.

Une première observation est que la chute de tension est plus petite pour un moteur que pour une génératrice, les conditions étant les mêmes.

Pour évaluer la distorsion, on mesure sur le cliché original les valeurs 29 et 25,5 mm pour les cornes polaires. Le rapport entre leur différence et leur moyenne arithmétique est $\frac{3,5}{27,2} = 12,8$ pour 100.

Dans la zone interpolaire, si on prend la moyenne arithmétique des valeurs moyennes que les ordonnées ont dans cette région pour deux zones qui se suivent, on trouve 3,3 mm, qui correspondent à 0,452 v et 410 gauss, comme champ magnétique. Pour qu'on puisse faire une comparaison, il faut ramener cette valeur, qui correspond à un courant de 16 A, à celle qu'on trouverait pour 17,5 A, donc nous aurons

$$410 \times \frac{17,5}{16} = 448 \text{ gauss.}$$

Cette valeur est inférieure de 10 pour 100 au champ trouvé dans la zone de commutation pour une génératrice.

D. Conclusions. — 23. De l'exposé que nous avons fait dans ce chapitre sur l'étude des champs magnétiques d'une dynamo, on peut déduire les conclusions suivantes :

a) Dans la zone interpolaire, le champ de réaction

de l'induit du type tambour présente un renforcement assez prononcé, compris entre deux minima, dont il faut tenir compte dans le calcul de la force électromotrice qui entre dans la commutation.

b) Les têtes de bobines jouent un rôle qui n'est point négligeable; leurs actions s'ajoutent à l'action des parties actives des conducteurs et contribuent d'une manière directe à la formation du renforcement.

c) Un léger raccourcissement du pas n'entraîne pas de diminution notable du renforcement.

d) Les induits très divisés présentent la même allure en pointe, mais la valeur du rapport entre le maximum et les points voisins est plus petite.

e) L'enroulement parallèle aussi bien que l'enroulement série présentent la même caractéristique quant à la distribution du champ magnétique.

f) On ne peut pas étendre les conclusions déduites d'un anneau Gramme à un induit en tambour ou inversement.

g) La valeur que le champ accuse au point de renforcement semble être la même dans l'air que dans la carcasse, avec le système inducteur excité.

h) Pour avoir le champ résultant dans l'entrefer, il faut composer la courbe qui représente le champ de l'inducteur en présence de l'induit non traversé par le courant avec la courbe obtenue en alimentant l'induit en présence de l'inducteur excité.

i) La distorsion, la chute de tension et la valeur du champ dans la zone de commutation sont moins fortes dans le fonctionnement en moteur qu'en génératrice.

j) Les courbes relevées pour les champs à l'état statique sont retrouvées à l'état dynamique, comme forme et aussi comme valeur numérique, bien entendu en tenant compte de l'approximation que les mesures oscillographiques comportent. Il en résulte qu'on peut très bien suivre toutes études de champs magnétiques d'une machine électrique à l'état statique.

CHAPITRE III

Etude de la commutation sans pôles auxiliaires

24. Dans le deuxième chapitre sur les théories relatives à la commutation, nous avons montré les différentes manières d'envisager les forces électromotrices qui prennent naissance dans la section en court-circuit.

Pour réaliser une bonne commutation, différents critères ont été proposés par les auteurs ; nous allons les étudier dans ce chapitre.

L'école d'Arnold, qui exige la condition donnée au paragraphe 2, aboutit à la conclusion que la commutation sera d'autant meilleure, que la résistance du circuit comprise entre deux lames de collecteur sera plus grande et d'autant plus favorable que le charbon lui-même aura une plus grande résistance de contact. L'apparition des balais en charbon a été chaleureusement accueillie parce qu'ils présentaient une résistance de contact beaucoup plus grande que les balais métalliques. On en attendait une grande amélioration du fonctionnement des machines à courant continu. On recommande jusqu'à présent l'emploi des charbons les plus résistants pour les « commutations particulièrement difficiles ». On entend par charbons résistants, ceux qui présentent une grande résistance de contact et qui, en général, sont durs ou au moins semi-durs au point de vue physique.

M. Mauduit, dans son étude citée plus haut, émet l'opinion que la cause pour laquelle les balais en charbon se comportent mieux que les balais métalliques doit être cherchée non pas surtout dans leur grande résistance, mais plutôt dans la propriété que le charbon possède d'étouffer les étincelles. Les balais en charbon jouiraient donc d'une propriété anti-arc et une sorte de charbon se comporterait mieux qu'une autre dans la commutation, suivant qu'elle posséderait plus ou moins cette propriété.

Dans nos études, nous avons utilisé des balais de la série LFC et EG de la Société « Le Carbone » de Levallois-Perret (Seine), que son directeur, M. Gindre, à qui nous adressons nos plus vifs remerciements, a mis à notre disposition.

A. Moyen d'investigation. — 25. Le but que nous nous sommes proposé était d'étudier la manière dont se comporte chacune de ces sortes de balais sur la même machine et autant que possible dans des condi-

tions identiques, afin d'en tirer quelques conclusions d'ordre pratique.

Pour y arriver, nous avons utilisé deux moyens différents d'investigation.

Le premier consistait dans une observation directe de l'apparition des premières étincelles au collecteur. On faisait débiter la machine (en l'espèce, la dynamo spéciale H-100/2, dont les constantes ont été données au § 10), fonctionnant en génératrice, sur une résistance très divisée, qui permettait la recherche du courant pour la première étincelle. Pour avoir plus de précision dans cette observation, qui, d'ailleurs, est forcément subjective, on faisait le noir complet dans la salle d'essai. Le courant considéré comme produisant les premières étincelles était le courant pour lequel celles-ci apparaissaient d'une manière assez régulière.

Dans le fonctionnement en moteur, pour avoir la charge voulue, on a employé un frein appliqué sur la poulie et manœuvré à la main.

Outre les premières étincelles, qui sont à peine visibles, nous avons observé dans chaque cas l'apparition d'étincelles, que nous avons dénommées nettement visibles. Le crachement qui se manifestait dans ce cas, à notre avis, était le maximum qu'on pourrait admettre sur un collecteur sans avoir à craindre ou la détérioration, par suite d'échauffement, ou la volatilisation de petites particules de cuivre.

Le deuxième moyen consiste dans l'utilisation de l'oscillographe pour évaluer les forces électromotrices qui entrent en jeu dans la spire en court-circuit.

I. PRÉPARATION DES BALAIS ET DU COLLECTEUR. — 26. Avant de commencer nos essais sur la commutation, nous avons vérifié que le collecteur tournait bien rond et que le mica ne dépassait pas les lames ; enfin nous avons pris les précautions nécessaires pour nous assurer qu'aucun défaut de cette provenance ne faussait l'expérience. D'autre part, nous nous sommes assurés que la machine en pleine vitesse ne présentait pas de vibrations qui, on le sait, changent complètement la qualité de la commutation.

Une fois la machine bien fixée et le collecteur soigneusement examiné, nous avons procédé à la préparation des balais.

Le rodage des charbons joue un rôle primordial dans toute étude de commutation, aussi bien que dans tout fonctionnement d'une machine à courant continu.

Pour avoir des balais bien formés, on recommande généralement d'employer de la toile d'émeri qu'on place entre le balai et le collecteur. Ce système est défectueux parce que, si mince que soit la toile utilisée, elle introduit forcément une augmentation de diamètre de rodage. Il s'ensuit que les balais ainsi rodés ne touchent le collecteur que sur une partie de leur surface. Donc, cette méthode n'est pas admissible quand on désire assurer un bon contact balai-collecteur.

La Société Le Carbone, dans sa brochure explicative sur les différentes sortes de balais, recommande un moyen très intéressant pour faire plus vite le rodage.

A la page 15, on trouve : « On prend une certaine quantité de carborundum amorphe très fin en suspension dans une dissolution de gomme-laque à l'alcool et la solution fortement agitée est ensuite étalée sur la surface du collecteur, entre deux lignes de balais au moyen d'un pinceau.

» Après séchage complet, la dynamo est mise en marche très lentement (40 à 50 t : mn) et le rodage des balais s'effectue ainsi automatiquement au bout d'une vingtaine de minutes ; naturellement la durée de ce rodage dépend de la durée des balais.

» Le collecteur étant nettoyé, la dynamo est mise en marche à sa vitesse normale, sans excitation, afin que la surface de contact des balais puisse se polir. La machine est mise en service après une ou deux journées de marche dans ces conditions. »

Nous avons utilisé cette méthode. Elle est assez intéressante pour les balais durs. Pour les balais tendres, il est nécessaire de surveiller l'opération attentivement, parce que l'usure est trop rapide et la poussière de charbon se dépose entre les grains de carborundum et finalement le balai est rayé. On peut écartier cet inconvénient en nettoyant la surface du collecteur, couverte du mélange décrit ci-dessus toutes les deux à trois minutes avec un morceau de drap qui enlève la poussière de charbon.

Mais, si mince que soit la couche étalée sur le collecteur, l'inconvénient de l'augmentation du diamètre du collecteur subsiste toujours. Il est absolument nécessaire que le rodage soit achevé sur le collecteur même.

Il faut suivre le conseil de la Société Le Carbone d'entraîner la machine, sans excitation, contrairement à ce qu'on a l'habitude de recommander, parce que, si on fait circuler du courant avant la fin du rodage, de petites étincelles se produisent juste à l'endroit où il n'y a pas de contacts ; ainsi, le balai se pique davantage au lieu de se polir. La piqure produite par ces étincelles est d'autant plus à craindre que le balai est plus tendre. Dans cette période de finissage de la surface des balais, la machine est entraînée, évidemment, à la vitesse normale et la pression des balais est poussée au maximum.

Pour l'entretien du collecteur, une fois le rodage

terminé, il ne faut jamais employer le papier émeri, de verre ou tout produit analogue, dont les grains rayent les balais et abiment le rodage. Même les grains de la pierre ponce laissent des traces qu'on aperçoit très nettement. Nous avons utilisé un morceau de drap grossier, avec lequel nous nettoyons le collecteur, dès qu'il y avait trop de charbon déposé. De cette manière le rodage s'est très bien conservé.

2. ESSAI AVEC LE BALAI EG 3450. — 27. Nous avons commencé nos études relatives aux balais avec un des derniers modèles que Le Carbone a fabriqués dans ses usines. Ces balais, d'après les renseignements qui nous ont été fournis, sont utilisées particulièrement sur des commutatrices de la Compagnie française pour l'Exploitation des Procédés Thomson-Houston, appliquées à la grande traction sur les réseaux de Chemins de fer du Midi et de la Compagnie du Chemin de fer de Paris à Orléans.

Tout d'abord, nous avons soumis ce balai à un essai, pour voir comment il se comporte à différentes vitesses, au point de vue apparition des étincelles.

Les dimensions des balais employés sont : 2 cm dans le sens axial du collecteur et 1,25 cm dans le sens périphérique ; chaque balai peut couvrir à la fois au maximum 2,5 lames et, par conséquent, il peut mettre en court-circuit trois sections. La surface en contact est ainsi de $1,25 \times 2 = 2,5 \text{ cm}^2$.

Tous ces essais ont été faits sur la machine H — 100/2 spéciale, dont la description a été donnée plus haut au paragraphe 10. Pour le moment, elle fonctionne en génératrice à courant continu.

On a observé, pour chaque valeur de la vitesse d'entraînement réalisée, l'intensité du courant qui doit passer dans l'induit pour que les premières étincelles apparaissent. La tension entre les balais a été gardée constante pendant toute l'expérience et égale à 20 v ; pour y arriver, on faisait varier le courant d'excitation qui était fourni par une batterie d'accumulateurs.

Les résultats de ces indications sont résumés dans une courbe de la figure 26.

Dans cette figure, il y a deux courbes ; la courbe en trait plein représente la variation du courant pour le balai positif, l'autre, en trait interrompu pointillé, pour le balai négatif. Les observations ont été faites sur le même balai, en conservant le même sens de rotation de l'induit et en changeant le sens du courant d'excitation. De cette manière, les conditions d'observations ont toutes les chances d'être pareilles dans les deux cas qui correspondent à ces deux courbes.

Il faut faire quelques remarques sur ces courbes :

1° Pour cette espèce de charbon les étincelles apparaissent pour un courant plus petit au balai positif, la vitesse ayant la même valeur. La courbe du balai négatif est au-dessus de celle qui se réfère au balai positif.

2° Les deux courbes présentent d'abord une partie descendante et, à partir d'une certaine valeur de l'abscisse, la courbe reste une horizontale. Cette valeur de l'abscisse est plus petite pour le balai positif.

3° Pour les vitesses plus faibles de la machine, les étincelles apparaissent pour un courant plus fort dans l'induit.

On considère la force électromotrice caractéristique écrite sous la forme générale

$$e = \frac{2 \mathcal{L} I}{T},$$

où $\mathcal{L}$ est la pleine inductance de la section.

En remplaçant dans cette relation le temps de com-

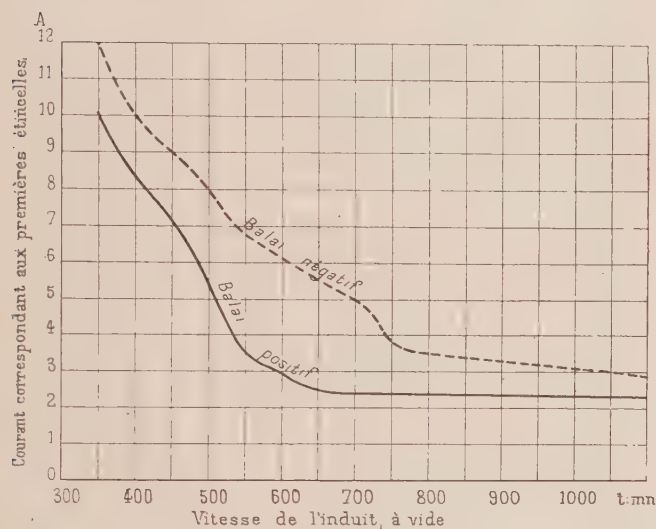


Fig. 26. — Variation du courant nécessaire pour l'apparition des premières étincelles au collecteur en fonction de la vitesse de rotation avec des balais en charbon EG 3450 et $E = 20$ v à vide.

mutation T par le nombre de tours par minute n , on a

$$e = K \mathcal{L} I n; \quad (1)$$

K contient des facteurs numériques, y compris le nombre des lames du collecteur.

La force électromotrice caractéristique qui provoque les étincelles dans la section, étant proportionnelle à la vitesse et au champ d'induit, il est tout naturel que, lorsque la vitesse diminue, le courant correspondant aux premières étincelles augmente en rapport inverse, donnant ainsi une branche d'hyperbole équilatère.

Pour la partie horizontale de la courbe, l'explication précédente ne convient plus.

D'après ce que M. Mauduit nous a fait observer, une certaine quantité d'énergie est nécessaire pour que l'étincelle se produise; il est alors probable que, pour des courants inférieurs à cette limite, la quantité d'énergie mise en jeu, qui est de la forme $1/2 \mathcal{L} I^2$, n'est plus suffisante pour produire des étincelles, quelles que soient la vitesse et la force électromotrice caractéristique.

M Gratzmuller (24), dans un mémoire publié en 1914, au contraire, était d'avis que l'énergie nécessaire serait

presque toujours fournie par le moindre courant de circulation dans la section en court-circuit et que la production de l'arc est fonction seulement de la différence de potentiel entre le balai et la lame qui le quitte.

Rappelons, d'ailleurs, que les étincelles, dont il vient d'être question, ne sont point nuisibles au fonctionnement de la dynamo, mais elles sont intéressantes pour notre étude.

Les étincelles nettement visibles, c'est-à-dire celles qui, à notre avis, constituent la limite d'un crachement admissible sur un collecteur apparaissent pour la vitesse de 1100 t : mn vers 6,3 A pour le balai positif et 9 A pour le balai négatif.

Il faut remarquer à cette occasion que les étincelles nuisibles naissent pour une densité de courant de $\frac{6,3}{2,5} = 2,5$ A : cm², alors que les balais sont recommandés pour une densité d'au moins 8 A : cm². On voit donc, que ce calcul de densité ne peut pas apporter de renseignements utiles en ce qui concerne l'apparition des étincelles.

28. On va continuer l'étude de la relation (1) écrite ci-dessus en prenant chaque fois deux quantités comme variables et en considérant les autres comme des constantes, la machine fonctionnant pour le moment en génératrice.

Les mesures ont été faites en prenant la tension de section de la dynamo entre deux petites bagues a et b, dont la description a été donnée dans le chapitre précédent.

Nous commençons par garder le courant débité constant $I = 2,4$ A, valeur pour laquelle apparaissent les premières étincelles et nous faisons varier la tension caractéristique e en fonction de la vitesse n . La différence de potentiel a été maintenue constante pendant toute l'expérience et égale à 20 v.

Les mesures ont été faites à l'oscillographe Blondel en partie sur des photographies et le reste, directement sur la plaque dépolie.

Les résultats sont inscrits dans la figure 27, courbe EG 3450.

En supposant comme tout à l'heure que $\mathcal{L}$ garde la même valeur, théoriquement il aurait fallu trouver une droite pour représenter la variation de la force électromotrice e en fonction de la vitesse n , parce que I est une constante dans cet essai. Le résultat expérimental est assez approché de la théorie, car la courbe telle qu'elle se présente peut très bien être considérée comme une droite, d'autant plus que les points ont été déterminés par des mesures oscillographiques qui ne donnent que des valeurs grossièrement approchées.

29. Laissons maintenant la vitesse de la machine constante et faisons varier la force électromotrice caractéristique e de la section en fonction du courant I que la dynamo débite.

Comme valeur de la vitesse, nous avons pris $n = 1100$ t : mn ; la force électromotrice à vide est $E_0 = 120$ v ; le courant d'excitation, qui était fourni par une batterie

d'accumulateurs n'a pas été modifié. La dynamo fonctionnant en génératrice débitait le courant sur des résistances.

La courbe G de la figure 28 représente le résultat de ces mesures. On a limité les essais à 15 A, car le crachement devenait trop violent et il y aurait eu à craindre la détérioration du collecteur.

Théoriquement, comme dans le cas précédent, la courbe devait être une droite, ce qui d'ailleurs est

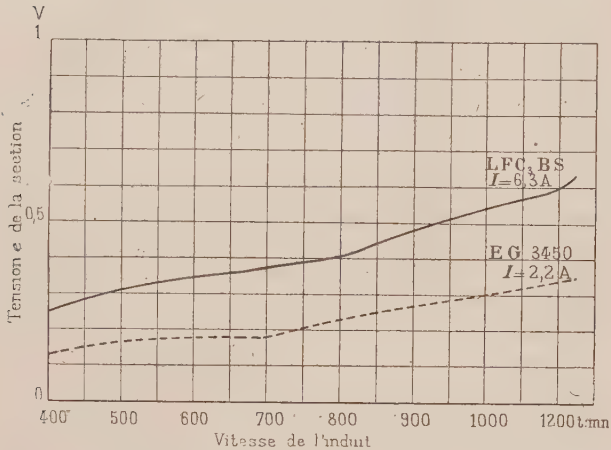


Fig. 27. — Variation de la tension de section de la dynamo H-100/2, fonctionnant en génératrice en fonction de la vitesse de rotation pour deux qualités de balais. $E_0 = 20$ V

approximativement réalisé, si on tient compte des erreurs dont nous avons parlé plus haut.

Outre la tension caractéristique qui est la valeur moyenne de la force électromotrice dans la zone de

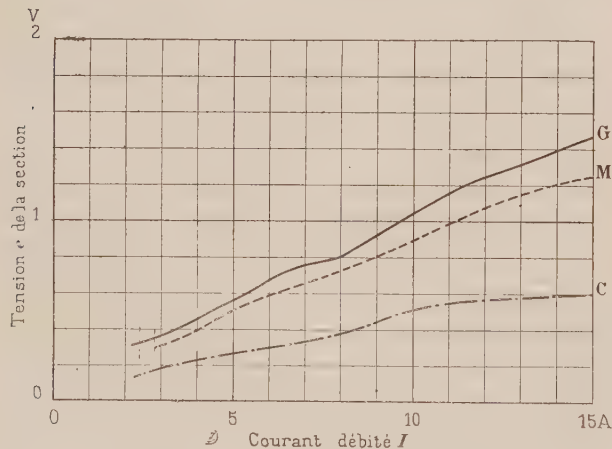


Fig. 28. — Variation de la tension moyenne de section avec la charge pour la marche en génératrice (G), moteur (M) et commutatrice (C), avec balai EG 3450. $E = 120$ V, $n = 1100$ t : mn.

commutation, nous avons relevé aussi la valeur de la pointe de commutation, différence de potentiel produite dans la section à l'instant final de la commutation,

pour différentes valeurs du courant. La figure 29 représente ces valeurs. On observe une forme absolument analogue avec des valeurs respectives plus élevées ; le fait est explicable parce que, dans la figure 28, intervient seulement la force électromotrice moyenne pendant le

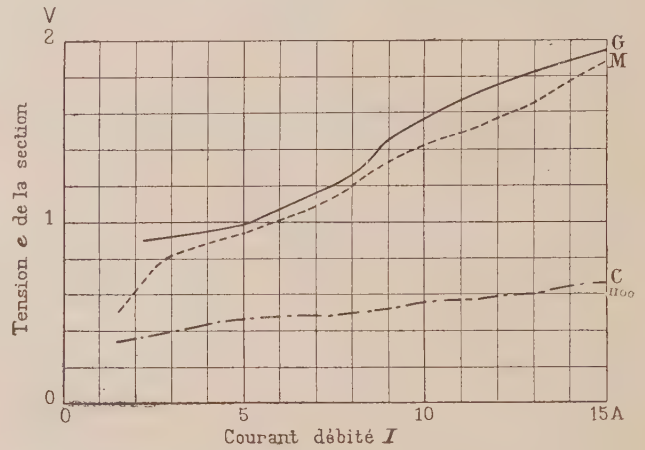


Fig. 29. — Variation de la tension de pointe de la section avec la charge pour la marche en génératrice (G), moteur (M) et commutatrice (C), avec balai EG 3450. $E_0 = 120$ V, $n = 1100$ t : mn.

court-circuit, tandis que cette différence de potentiel finale est produite par la variation brusque du champ provenant de la variation rapide du courant en fin de commutation.

30. Un autre essai a été fait pour observer la variation de la tension de pointe e_p , qu'on mesure dans la zone de commutation, quand on modifie le courant d'excitation, donc la différence de potentiel aux bornes de la dynamo. L'excitation était indépendante ; la variation était réalisée avec un rhéostat de champ.

Pendant cet essai, on a gardé la vitesse constante $n = 1100$ t : mn et le courant aussi $I = 2,4$ A, valeur pour laquelle on observe les premières étincelles au balai positif à la tension normale.

Sur la figure 30, on a inscrit les résultats (courbe

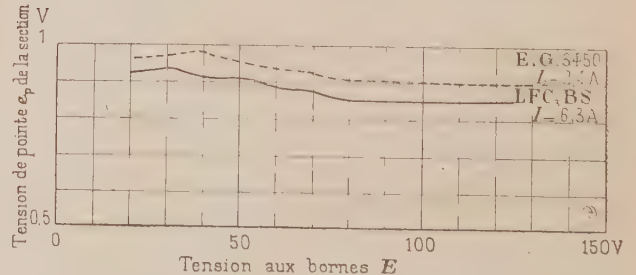


Fig. 30. — Variation de la tension de pointe e_p de la section, en fonction de la différence de potentiel aux bornes pour la vitesse $n = 1100$ t : mn et un courant donné.

EG). En observant cette courbe on voit une première partie descendante suivie d'une autre presque rectiligne. De plus, pour les valeurs plus faibles de la tension.

aux bornes de la dynamo, la tension e_p est plus forte.

Cette expérience confirme la supposition déjà faite au moment de l'étude des champs magnétiques, savoir que le champ d'induit dans la zone interpolaire et par conséquent la force électromotrice caractéristique acquièrent une valeur plus grande pour les faibles excitations, à cause de l'absence de saturation, car, en fait, l'augmentation ou la diminution de la différence de potentiel aux bornes n'est qu'un résultat qui suit la variation de l'excitation.

Cette courbe nous permet de tirer encore une conclusion : le moment où commence la portion rectiligne de la courbe nous indique en même temps le commencement de la saturation de la pièce polaire.

Nous avons essayé de vérifier les résultats obtenus par le moyen direct d'observation des étincelles sur le collecteur.

Le résultat est absolument en concordance avec celui qui vient d'être exposé plus haut. Pour une vitesse de rotation constante $n = 1100 \text{ t : mn}$, on a commencé par charger la dynamo sans excitation, donc sous l'action seule du magnétisme rémanent. Les étincelles apparaissent pour un courant plus faible 2, 2 A. Au fur et à mesure qu'on fait croître le courant envoyé dans le circuit d'excitation, la valeur du courant induit pour lequel les premières étincelles sont visibles augmente aussit au moment où l'on a 30 v comme tension aux bornes de la génératrice à vide, le courant atteint 2,4 A, valeur qui reste pratiquement constante, à partir de cet instant. Ces résultats expliquent et vérifient le fait connu qu'une génératrice à courant continu désaimantée présente des conditions de commutation plus difficiles que dans le cas de son fonctionnement normal, toutes autres conditions, vitesse, etc., restant les mêmes.

31. Après avoir vu le fonctionnement en génératrice, nous examinerons les résultats pour la marche en moteur.

Nous avons alimenté le moteur sous une différence de potentiel constante de 120 v fournie par une batterie d'accumulateurs. La vitesse de rotation était la même, 1100 t : mn.

Dans ces conditions, nous avons observé l'apparition des premières étincelles en fonction du courant qui passait dans l'induit ; la variation du courant était réalisée en agissant sur la charge du moteur. On a obtenu ces premières étincelles pour un courant $I = 2,8 \text{ A}$, donc légèrement supérieur à celui que nous avons rencontré pour la marche en génératrice. Le courant pour lequel on arrive aux étincelles nettement visibles est de 8 A.

Dans les deux cas, pour le fonctionnement en moteur, on trouve des valeurs d'environ 15 pour 100 plus grandes pour les courants qui produisent soit les premières étincelles, soit les étincelles nettement visibles, par rapport au fonctionnement en génératrice.

On a relevé, à l'aide de l'oscillographe, une courbe qui montre la variation de la tension caractéristique

pour le fonctionnement en moteur, en fonction du courant de circulation dans l'induit. C'est la courbe M de la figure 28. Comme allure générale, c'est bien la même que pour une génératrice, soit une droite. Le fait intéressant à remarquer est qu'elle se maintient tout le temps en dessous de la courbe similaire relevée pour la génératrice. Comme écart entre les deux courbes, on peut admettre 10 à 15 pour 100. Pour la tension de pointe, c'est la courbe analogue M de la figure 29.

32. Dans la description que nous avons donnée de la machine spéciale H-100/2, nous avons indiqué qu'elle est munie de trois bagues qui permettent de l'alimenter en courant triphasé et de la faire fonctionner en commutatrice.

On a réglé la tension alternative, pour que la tension du côté continu soit de 120 v à vide. La vitesse minimum réalisée était de 1900 t : mn, étant donné la fréquence minimum que nous avions à notre disposition pour le courant d'alimentation.

Nous avons fait les mêmes observations sur l'apparition des étincelles. On a observé que les premières se manifestent pour un courant $I = 4 \text{ A}$, dans le circuit de charge, du côté continu ; les autres, nettement visibles, se montrent pour un courant de 12 à 13 A.

On constate donc, dans le cas de la commutatrice, que les deux sortes d'étincelles, dont l'apparition nous intéresse, correspondent à des valeurs du courant induit, qui par rapport aux valeurs respectives sont environ 1,6 fois plus grandes que les valeurs correspondant à la marche en génératrice. Cela signifie que la commutation, dans ce cas, est plus facile à réaliser. Mais, de plus, il ne faut pas oublier que la commutatrice tournait à 1900 t : mn au lieu de 1100 t : mn et en admettant que la commutation devienne plus difficile dans la même proportion, nous aurons, pour le rapport

$$\text{trouvé plus haut, } 1,6 \times \frac{1900}{1100} = 2,76$$

En même temps, on a cherché la variation de la tension caractéristique e en fonction du courant débité du côté à courant continu. La courbe C de la figure 28 représente cette variation.

Il faut remarquer que toutes les valeurs mesurées à l'oscillographe ont été réduites dans le rapport $\frac{1900}{1100}$ pour rendre possible la comparaison des trois courbes tracées sur la même figure et à la même échelle. Dans les mêmes conditions, on a relevé la courbe C de la figure 29 qui donne la valeur de la différence de potentiel de pointe e_p ; elle est absolument analogue à la précédente.

3. ESSAI AVEC LE BALAI LFC₃BS. — 33. Une deuxième sorte de balai que nous avons employée est le balai LFC₃BS toujours de la Société Le Carbone. Le balai est utilisé, d'après les indications de la maison de construction pour les machines normales à grande vitesse, surtout commutatrices et convertisseurs modernes.

Ce balai sera soumis aux mêmes essais que le précé-

dent et dans les mêmes conditions afin qu'on puisse faire une comparaison au point de vue du fonctionnement.

Avant de commencer les essais, on a bien rodé le balai et nettoyé le collecteur. Il faut remarquer, à cet égard, que l'emploi du balai LFC exige un nettoyage plus fréquent du collecteur avec un morceau de drap, tel que nous l'avons déjà indiqué plus haut; cela tient au fait que ce balai est beaucoup plus tendre et qu'il laisse sur le collecteur des traces de charbon qui peuvent, faute d'un bon nettoyage, faciliter la production des étincelles et, par suite, fausser les résultats.

Nous avons commencé par chercher l'allure de la courbe qui représente la variation d'apparition des premières étincelles en fonction de la vitesse. En procédant de la même manière qu'auparavant, on trouve la courbe représentée dans la figure 31.

On observe un fait caractéristique avec ces balais, la

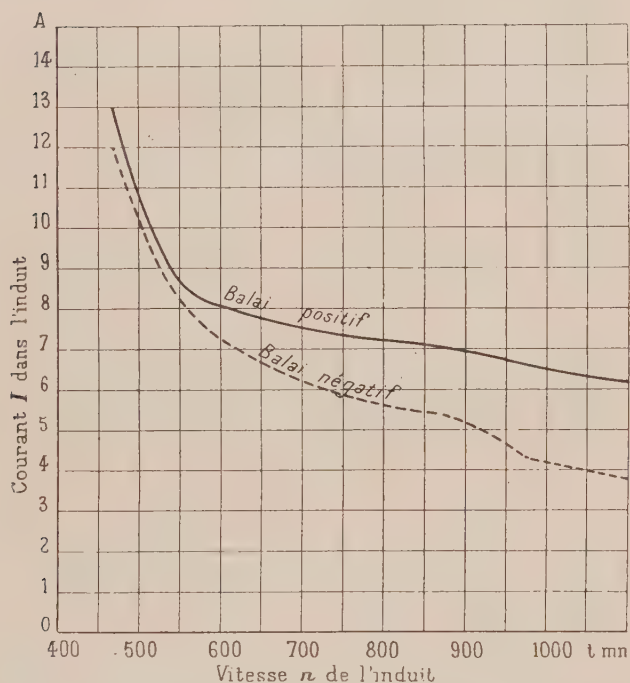


Fig. 31. — Variation du courant nécessaire pour l'apparition des premières étincelles au collecteur en fonction de la vitesse de rotation pour le charbon LFC₃BS. $E_0 = 20$ v, à vide.

courbe représentant la variation cherchée pour le balai positif reste tout le temps en dessus de celle qui représente la variation pour le balai négatif.

Pour la vitesse, considérée comme normale dans tout ce travail, de 1100 t/mn, l'apparition des premières étincelles au balai positif se manifeste pour un courant de 6,3 A et au balai négatif, 3,8 A.

La courbe, dans l'intervalle étudié, présente l'allure d'une branche d'hyperbole — évidemment très grossièrement approchée — mais sans atteindre la zone avec partie rectiligne du cas précédent.

En suivant la même étude que pour le balai EG, nous avons tracé les courbes suivantes dans des conditions absolument identiques, la dynamo fonctionnant en génératrice.

Dans la figure 27, la courbe LFC₃BS représente la tension caractéristique de la section en commutation en fonction de la vitesse de la dynamo à tension constante et excitation variable.

Cette courbe est la représentation de la formule (1) du § 27. C'est bien une droite, comme dans le cas du balai EG 3450. Les conditions de l'essai sont : tension à vide de la dynamo $E_0 = 20$ v, courant débité par la génératrice $I = 6,3$ A, valeur pour laquelle on observe les premières étincelles.

La figure 32 — qui correspond à la figure 29 pour le

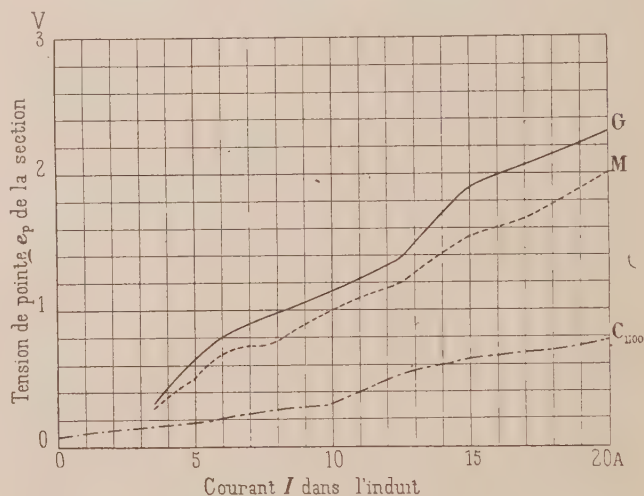


Fig. 32. — Variation de la tension de pointe de la section avec la charge pour la marche en génératrice (G), moteur (M) et commutatrice (C), avec balai LFC₃BS et $E_0 = 120$ v.

balai EG — représente la variation de la tension de pointe e_p en fonction du courant débité I , pour une vitesse n constante de la machine. Rappelons que les conditions de fonctionnement sont absolument identiques dans les cas des deux figures 28 et 31.

La dynamo fonctionnant en génératrice donne la courbe G; en moteur M et en commutatrice C.

Dans ce cas, remarquons d'abord que la forme peut-être considérée comme à peu près linéaire, d'après la relation indiquée plus haut.

La deuxième remarque se rapporte aux valeurs respectives de la tension de pointe e_p pour les trois fonctionnements de la machine. Le rapport de ces tensions entre la marche en génératrice et en moteur est de 1,15, soit une différence de 15 pour 100; entre la génératrice et la commutatrice le même rapport est de 2,9; ces valeurs ont été prises pour des courants qui se rapprochent de la valeur limite de fonctionnement. Cette fois-ci, on a pu faire l'essai jusqu'à une intensité de 20 A, le crachement au collecteur étant moins fort que dans le cas des balais EG. Quant aux tensions caractéristiques, les valeurs sont presque les mêmes que dans

la figure 28 et on n'a plus donné les courbes respectives.

Dans le fonctionnement en moteur, à 1100 t : mn avec une tension d'alimentation de 120 v, de la dynamo spéciale, les premières étincelles apparaissent pour le balai positif vers la valeur de 8 A du courant d'alimentation. Les étincelles nettement visibles font leur apparition assez tard, par comparaison avec les balais EG, pour un courant de 20 A dans l'induit. Il faut faire observer que ces étincelles qui se produisent à 20 A sont moins fortes que celles que l'on obtenait à 8 A avec les balais EG et que la transition entre les toutes petites étincelles et les plus violentes est beaucoup plus brusque dans le cas des balais LFC que dans le cas des balais EG.

Dans la marche en commutatrice avec les balais LFC, pour le balai positif les premières étincelles sont visibles à peine pour un courant de 12, 5 A du côté à courant continu. Si on augmente le courant débité, les étincelles deviennent de plus en plus visibles, mais à 22 A elle n'atteignent pas encore l'intensité nécessaire pour qu'on puisse les dénommer nettement visibles.

Dans la figure 30, la courbe LFC₃BS représente la tension de pointe correspondant à différentes valeurs du courant d'excitation et de la tension aux bornes de la machine, en gardant des valeurs constantes pour le courant, 6,3 A et pour la vitesse, 1100 t : mn. On peut faire les mêmes observations qu'à l'alinéa 30.

4. COMPARAISON ENTRE LES BALAIS EG 3450 ET LFC₃BS.
— a) Sur la dynamo. — 34. Après avoir vu séparément les propriétés de ces deux balais EG 3450 et LFC₃BS au point de vue commutation, il est intéressant de rapprocher les résultats acquis et de mettre en évidence les conclusions.

Nous commencerons par l'examen des courbes représentées dans les figures 26 et 31.

Dès le début, on constate une analogie frappante entre les portions que nous avons considérées comme branche d'hyperbole; quant à la partie rectiligne, elle n'existe plus sur la figure 31. D'autre part, on observe très facilement, les courbes ayant la même échelle, que la deuxième peut être considérée comme provenant de la première, après transformation des axes I et n en $I + I_1$ et $n + n_1$. Il est probable que la partie rectiligne aurait été atteinte si on avait pu augmenter encore la vitesse. Avec les balais LFC qui ont servi pour la deuxième expérience, on n'est pas encore arrivé à la valeur limite du courant au-dessous de laquelle les étincelles cessent de se produire, quelle que soit la vitesse.

Cette valeur limite avait été atteinte pour une vitesse d'environ 700 t : mn avec les balais EG; elle n'est pas encore atteinte pour 1100 t : mn avec les balais LFC.

Il est donc logique d'employer les balais LFC pour des vitesses plus grandes de préférence aux balais EG, conformément à ce que recommande la maison de construction.

D'autre part, pour des valeurs correspondantes de la vitesse, les intensités du courant pour lesquelles les premières étincelles apparaissent sont plus fortes pour les balais LFC que pour les balais EG. Comme, dans les deux cas, les conditions sont absolument identiques en ce qui concerne la tension caractéristique et l'énergie mise en jeu pendant le renversement du courant, la seule hypothèse qu'on peut faire pour justifier cette différence doit se rattacher aux propriétés particulières de ces balais en face des étincelles. Il semble donc que le balai LFC₃BS jouit d'une propriété anti-arc plus développée que l'autre balai EF 3450. Il faut remarquer que le balai EG est plus dur et plus résistant que celui de marque LFB; donc cette conclusion déduite expérimentalement ne confirme pas les affirmations habituelles sur les propriétés particulièrement précieuses dans la commutation de la dreté et de la grande résistance des balais.

Cette conclusion se déduit aussi comme conséquence des observations directes que nous avons faites et dont les résultats sont groupés dans le

TABLEAU B

	PREMIÈRES ÉTINCELLES		ÉTINCELLES NETTEMENT VISIBLES	
	EG3450 A	LFC ₃ BS A	EG3450 A	LFC ₃ BS A
Génératrice	2,4	6,3	7	15
Moteur.....	2,8	8	8	20.
Commutatrice	4	12,5	12/13	> 22

Il est très facile d'observer, en lisant seulement ce dernier tableau, l'avantage des balais LFC₃BS par rapport aux balais EG 3450.

Les mêmes courbes (26 et 31) font ressortir également que les balais EG et LFC se comportent de façon inverse au point de vue du fonctionnement en balai positif ou négatif.

Les figures 29 et 32 montrent que les tensions de pointe qu'on mesure dans la zone interpolaire ont des valeurs plus fortes pour le balai EG que pour le balai LFC dans les mêmes conditions d'expérience et pour n'importe quel mode de fonctionnement de la machine, en génératrice, moteur ou commutatrice.

Pour mieux voir les différences, nous donnons aussi le tableau C, à la page suivante, duquel ressortent plus facilement les valeurs qui correspondent à une certaine intensité de courant pour les deux espèces de balais.

On a souligné d'un trait plein les valeurs pour lesquelles apparaissent les premières étincelles et d'un trait pointillé les valeurs qui montrent les étincelles nettement visibles.

35. En résumé, de cette analyse faite sur les balais

TABLEAU C

COURANT	e_r CALCULÉE	e , MESURÉE, EN VOLTS					
		GÉNÉRATRICE		MOTEUR		COMMUTATRICE	
		EG	LFC	EG	LFC	EG	LFC
1,5	0,051			0,5			0,11
2,4	0,082	0,9	0,7			0,35	0,14
2,8	0,096			0,8			
3,5	0,119		0,32		0,285		0,16
4	0,136					0,435	
5	0,17	0,98	0,64	0,95	0,5		0,185
6,3	0,215		0,83		0,715		0,23
7	0,24	1,15					
8	0,272	1,25		1,2	0,78		0,28
9	0,305	1,47				0,515	
10	0,34		1,13	1,41	1		0,32
11,5	0,392						0,40
12	0,41						
12,5	0,425	1,8	1,38	1,6	1,21	0,595	0,57
15	0,51	1,96	1,9	1,87	1,52	0,65	0,65
17,5	0,6		2,1		1,71		0,7
20	0,68		2,3		2		0,79

EG 3450 et LFC₃ BS de la Société Le Carbone, il résulte les conclusions suivantes :

a) Les balais LFC se comportent mieux pour les grandes vitesses que les balais EG ;

b) Les balais LFC se comportent mieux que les balais EG au point de vue de l'apparition des étincelles au collecteur et au point de vue de la tension de pointe mesurée dans la zone de commutation.

Il semble donc que les balais LFC, quoique plus tendres que les autres et aussi moins résistants, sont meilleurs au point de vue de la commutation.

c) La commutation est légèrement moins facile pour la marche de la même machine en moteur qu'en génératrice ; le fonctionnement en commutatrice est de beaucoup le plus facile.

d) Les étincelles apparaissent pour des valeurs de la densité du courant beaucoup plus faibles que celles indiquées par le fabricant de balais.

b) *Commutation sur section artificielle.* — 36. Les expériences conduites sur une dynamo ont un grave inconvénient ; elles ne permettent ni d'examiner la forme de la courbe du courant commuté, ni de mesurer le courant qui passe dans la section en court-circuit

pendant la commutation. A défaut de cette valeur, on est dans l'impossibilité d'évaluer l'énergie mise en jeu dans l'étincelle et, par suite, de se rendre compte même grossièrement, de la quantité d'énergie que chaque balai est capable d'absorber sans produire d'étincelles.

Pour mieux examiner les différentes propriétés des balais dont nous nous occupons, on a estimé qu'il est de toute nécessité d'avoir les valeurs ci-dessus : courant coupé et énergie mise en jeu.

Ne pouvant les obtenir sur la dynamo elle-même, nous avons utilisé dans ce but le dispositif employé par M. Mauduit (voir sa thèse, chapitre IV, page 108) dans ses études sur la commutation.

Nous rappellerons très brièvement le principe du montage (fig. 33) de cet appareil. Il est constitué par

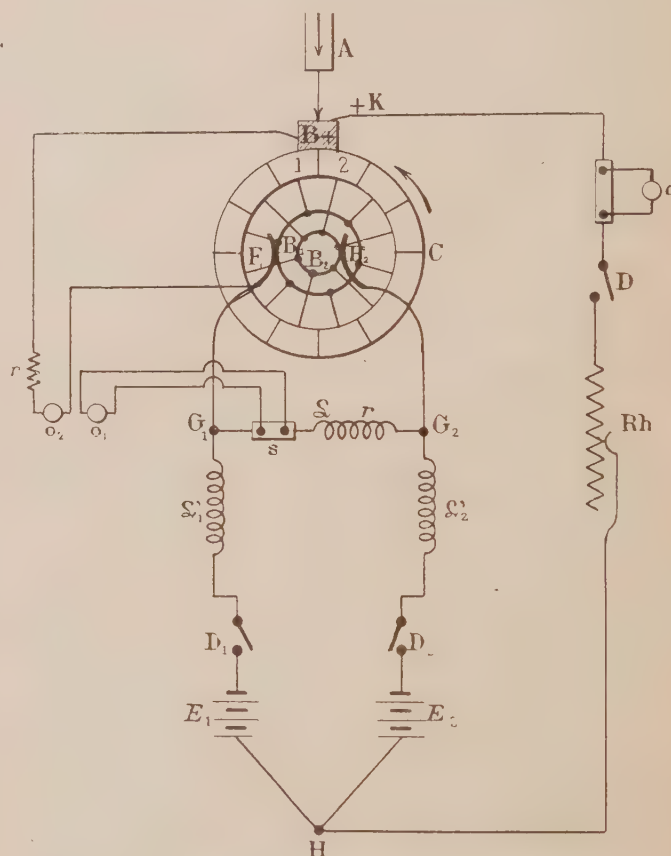


Fig. 33. — Schéma de connexion de la section artificielle.

un commutateur tournant C, comprenant douze lames ; les lames impaires sont reliées à une bague B₁ et les lames paires à une autre bague B₂ ; ces bagues sont montées sur le même arbre et portent deux frotteurs principaux F₁ et F₂.

Deux batteries d'accumulateurs semblables E₁ et E₂ comprenant chacune quinze éléments sont réunies en un point H, par leur pôle négatif, par exemple ; les autres pôles sont connectés séparément à deux bornes principales G₁ et G₂ qui constitueront les extrémités de

la section artificielle fixe à étudier. Dans chacune de ces connexions, on place un interrupteur D_1 et D_2 et une bobine de self induction $\mathcal{L}'_1$ et $\mathcal{L}'_2$.

La section $G_1 G_2$ comprend un shunt d'ampèremètre qui sert de résistance, permettant de relever avec l'oscillographe bifilaire O_1 le courant dans la section en étude et une bobine de self-induction amovible $\mathcal{L}$, dont les valeurs peuvent être choisies à volonté; la résistance du circuit est constituée par la résistance de la bobine elle-même.

Les extrémités G_1 et G_2 de la section sont reliées aux frotteurs principaux F_1 et F_2 ; sur le collecteur repose, à la partie la plus haute, le balai B à étudier, dont la longueur périphérique doit être inférieure à la largeur d'une lame et qui forme le pôle positif K de la dynamo artificielle.

Entre les bornes H et K est intercalé un circuit extérieur d'utilisation formé d'un rhéostat habituel R_h , un interrupteur D et un ampèremètre a .

Un autre oscillographe O_2 est branché, avec une résistance r convenable en série, entre un point du balai au voisinage du contact et un des frotteurs, par exemple F_1 pour que le bifilaire puisse enregistrer la différence de potentiel entre l'une des séries de lames et le balai.

L'arbre sur lequel sont clavetés le collecteur et les bagues est commandé par un moteur à courant continu, alimenté par une batterie d'accumulateurs, de façon à réaliser une vitesse aussi constante que possible.

Examinons le fonctionnement du système.

Le collecteur étant en marche à une vitesse quelconque, considérons un instant un peu antérieur à celui qui correspond à la figure 33 et où le balai ne porte que sur la lame 1. Alors le courant J de la batterie E_1 passe directement par le frotteur F_1 , la bague B_1 , la lame 1, le balai et se rend au circuit extérieur, tandis que le courant J de la batterie E_2 , ne pouvant passer par la lame 2 qui ne touche pas le balai, se rend au circuit extérieur en traversant la section dans le sens $G_2 G_1$ et en empruntant, à partir du point G_1 , le même chemin que le courant de la dérivation précédente. Il en est ainsi tant que le balai B ne touche que la lame 1. Dès que la lame 2 arrive sous le balai, une portion du courant de la dérivation 2 se rend directement au balai par $F_2 B_2$ et la lame 2; le courant dans la section, qui était au préalable J , diminue de la quantité $J - i$, qui passe par la lame 2; de même le courant dans la lame 1, qui était au début $2J$, n'est plus que $J + i$. Sous l'action des résistances de contact et d'après les résistances r et R_1 de la section et des connexions et la self-induction $\mathcal{L}$ de cette section, les courants se répartissent sous les lames 1 et 2 suivant une certaine loi, de même le courant i varie dans la section pour atteindre finalement la valeur $-J$, quand la lame 1 a quitté le balai et a été remplacée par la lame 2; le processus recommence alors en sens inverse, le courant $2J$ passant par la lame 2, une moitié venant directement de E_2 , l'autre moitié venant de E_1 , à travers la section, dans le sens $G_1 G_2$.

Quand la troisième lame arrive à son tour sous le balai, comme elle est reliée à la lame 1, le renversement du courant se reproduit en sens inverse dans la section, comme si la lame 1 rentrait elle-même sous le balai.

Le renversement du courant dans la section se produit donc exactement comme dans une dynamo, à cette différence près, que chaque groupe de lames, paires et impaires, joue à son tour le rôle de première et dernière lame de la section et qu'il se produit dans cette section des inversions alternativement de sens différents.

Les inductances $\mathcal{L}'_1$ et $\mathcal{L}'_2$ ont pour but de maintenir le courant constant dans chaque dérivation, pour réaliser ce qui se passe sensiblement dans une dynamo.

Le porte-balai, spécialement construit d'après les indications de M. Mauduit, est à glissière et à réglages multiples, qui facilitent beaucoup l'achèvement du rodage et la mise en place sur le collecteur.

La pression sur le balai est assurée à l'aide d'un dispositif spécial, employant un ressort; avant de commencer les essais, nous avons étalonné soigneusement ce ressort pour connaître aussi exactement que possible la pression sur le balai.

Comme bobine de self-induction $\mathcal{L}$, nous avons utilisé une bobine en ruban de cuivre, conforme au schéma de la figure 34. Ce sont trois galettes compo-

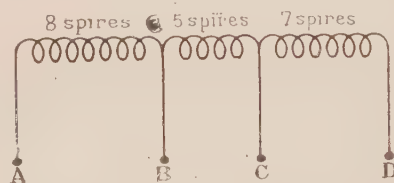


Fig. 34. — Schéma de la bobine utilisée comme section dans le montage précédent.

sées respectivement de 8,5 et 7 spires. On a différentes valeurs de la self-induction suivant les extrémités qu'on utilise. On a mesuré la self-induction à l'aide d'un courant alternatif produit par un alternateur sous 350 p.s environ. La résistance a été mesurée en courant continu et les valeurs trouvées sont inscrites dans le tableau ci-dessous :

	BOBINES			
	AB	BC	AC	AD
Nombre de spires.....	8	5	13	20
Résistance, en milliohms.....	26	17	43	66
Self-induction, en microhenrys.	51,5	28	124	280

Le collecteur possède 12 lames, dont le pas est 2,31 cm; donc le diamètre est 8,8 cm. Le mica qui sépare les lames a une épaisseur de 0,7 mm; il n'est pas gratté. L'ensemble est en très bon état et tourne bien rond.

37. A l'aide de deux équipages bifilaires, nous avons relevé les courbes représentées dans la figure 35.

La courbe i représente le courant dans la section; la courbe e , la tension entre le balai et une paire de lames.

En examinant de plus près ces photographies, on peut suivre le mécanisme du phénomène de commutation.

Avant la commutation, le courant qui passe dans la section est constant ; on l'observe figuré par le palier a b de la courbe i . A partir du point b, la commutation commence et le courant varie de $+J$ vers zéro et ensuite vers $-J$, suivant une forme qui dépend des constantes de la section.

La tension entre le balai et la lame avant ou arrière est aussi enregistrée par l'oscillographe et représentée par la courbe ε . En c se produit la séparation brusque du balai et de la lame 1, ce qui donne naissance à une étincelle avec le courant variant rapidement suivant cd. La différence de potentiel croît d'abord de la valeur p à r et ensuite brusquement à s. La première partie p r,

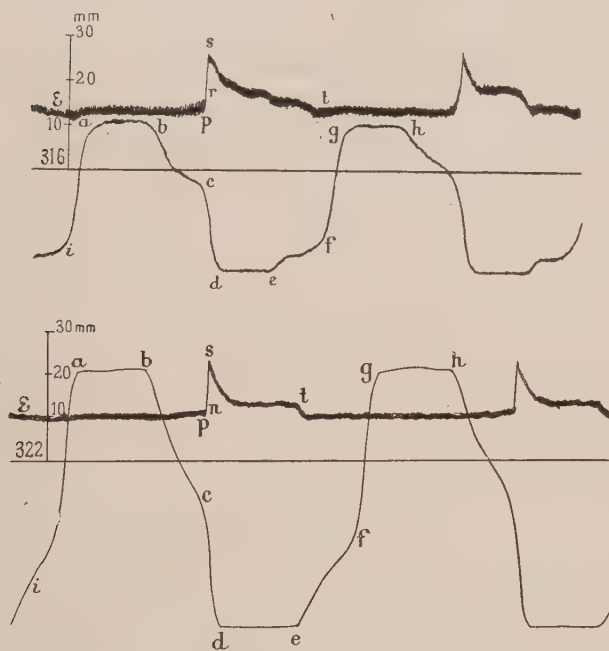


Fig. 35. — Oscillogramme du courant i et de la tension ε dans la section artificielle. $L = 280 \mu\text{H}$, $r = 66$ milliohms, pression $= 250 \text{ g} : \text{cm}^2$; a) (cliché 316), balai EG 3450 (+), $S = 2,55 \text{ cm}^2$, $2J = 13 \text{ A}$, $n = 600 \text{ t} : \text{mn}$; b) (cliché 322), balai LFC₃BS (+), $S = 2,5 \text{ cm}^2$, $2J = 20 \text{ A}$, $n = 640 \text{ t} : \text{mn}$. Apparition des premières étincelles.

un léger arrondi, est due à la résistance du contact et à la densité de courant qui a augmenté très vite; la deuxième partie r s représente l'étincelle elle-même qui termine la commutation. La différence de potentiel diminue ensuite pour regagner sa valeur moyenne de passage; cette descente n'est pas assez brusque sur l'oscillogramme à cause de l'insuffisance des self-inductions de dérivation et de la faible tension employée, 30 v (25).

Après le point d vient un intervalle de où tout le courant passe par une seule lame et, par conséquent, reste constant, la courbe présentant d'ailleurs un palier.

A partir du point e une nouvelle commutation commence; mais, maintenant la lame dont la tension est en étude est une lame arrière; donc, la tension relevée devient une fonction de ε_2 . Pendant ce temps, qui suit la coupure par étincelle, la tension entre le balai et la lame arrière s'établit en descendant de la valeur due à la coupure brutale à la valeur normale, c'est-à-dire la tension varie de s à t. En f se produit l'inversion du courant et la différence de potentiel entre balai et lame arrière passe par un minimum, c'est la tension de passage ou la différence de potentiel due à la résistance de contact, sous la densité de courant moyenne. Ensuite la différence de potentiel et le courant continuent à parcourir la courbe jusqu'au point g où la commutation est finie; à ce moment, tout le courant passe par la lame arrière, etc.

Les arrondis qu'on observe en a et en d sont dus à l'insuffisance des inductances L_1 et L_2 .

Remarquons que la variation de la résistance de contact avec la densité, au moment où celle-ci s'accroît très vite, reste très modérée et subit seulement un accroissement de p à r.

38. Les oscillogrammes de la figure 35 se rapportent : cliché 316 à un balai EG 3450 utilisé comme balai (+), dont la surface est $1,5 \times 1,7 = 2,55 \text{ cm}^2$. Le courant total est $I = 2J = 13 \text{ A}$; la self-induction de la section est $280 \mu\text{H}$ et sa résistance 66 milliohms, la vitesse du collecteur $600 \text{ t} : \text{mn}$ et la pression sur le charbon $250 \text{ g} : \text{cm}^2$. Le cliché 322 se réfère à un balai LFC₃BS, utilisé également comme balai (+) avec une surface de $1,35 \times 1,85 = 2,5 \text{ cm}^2$. Le courant total est 20 A ; la vitesse $640 \text{ t} : \text{mn}$; la pression $250 \text{ g} : \text{cm}^2$; la self-induction et la résistance sont les mêmes. Les deux clichés ont été relevés à l'apparition des premières étincelles et c'est ainsi que s'explique la différence de l'intensité du courant.

La question qui nous intéresse spécialement, savoir, les différences entre ces deux qualités de balais, peut recevoir des éclaircissements en utilisant cette méthode de commutation artificielle qui s'impose spécialement pour l'étude des balais.

Sur les clichés, on a mesuré les valeurs de la différence de potentiel de coupure ε_0 , au point r, pour les deux qualités. On trouve : $\varepsilon_0^E = 2,1 \text{ v}$ pour le balai EG 3450 et $\varepsilon_0^L = 3,5 \text{ v}$ pour le balai LFC₃BS (les lettres affectées de l'indice E en haut ou en bas se réfèrent au balai EG 3450 et celles qui ont l'indice L au balai LFC₃BS). Mais, nous avons dit que les deux clichés sont relevés dans des conditions semblables d'étincelles, il résulte que le balai LFC tolère une différence de potentiel plus grande que l'autre avant production de l'étincelle; c'est bien le résultat trouvé sur la dynamo.

D'autre part, en comptant le courant coupé (la valeur entre c et le palier inférieur, par exemple), on trouve $i_0^E = 8,7 \text{ A}$ et $i_0^L = 11,4 \text{ A}$. On voit donc que le courant coupé par le balai LFC pour produire les mêmes étincelles est plus grand que pour le balai EG.

39. Un autre élément qui caractérise un balai, c'est l'énergie mise en jeu dans l'étincelle par centimètre

d'arête pour une étincelle aussi bien définie que possible.

D'après le calcul d'Arnold et de M. Mauduit, cette énergie a la forme

$$B = \int \epsilon_1 i_1 dt,$$

où ϵ_1 est la chute de tension dans la lame avant;

i_1 , le courant dans la même lame;

dt , le temps pendant lequel se passe le phénomène.

Si on suppose que l'étincelle dure pendant le temps t_0 de passage sur l'isolant et que la tension entre le balai et la lame varie linéairement pendant ce temps de la valeur ϵ_0 , tension de coupure, à la valeur ϵ_p , tension de pointe, on a la relation, en admettant la même loi linéaire pour le courant de coupure i_1 ,

$$\begin{aligned} B &= \int_0^{t_0} \epsilon_1 i_1 dt = \int_0^{t_0} \left(\epsilon_0 + \frac{\epsilon_p - \epsilon_0}{t_0} t \right) \left(i_0 - \frac{i_0}{t_0} t \right) dt \\ &= t_0 i_0 \frac{\epsilon_p + 2\epsilon_0}{6}. \end{aligned}$$

Au lieu de l'énergie, on peut envisager la puissance moyenne mise en jeu, en divisant par t_0 ; on a ainsi

$$\frac{B}{t_0} = i_0 \frac{\epsilon_p + 2\epsilon_0}{6} \text{ watts.}$$

Les oscillogrammes de la figure 35 donnent, pour le balai EG 3450 (cliché 316),

$$2J = 13 \text{ A}, \quad i_0 = 8,7 \text{ A}, \quad \mathcal{E} = 280 \mu\text{H}, \quad R = 66 \text{ milliohms},$$

$$\epsilon_0 = 2,1 \text{ V}, \quad \epsilon_p = 4,5 \text{ V}, \quad \epsilon_m = 1,8 \text{ V};$$

ϵ_m est la tension moyenne de passage.

$$\frac{B}{t_0} = 8,7 \frac{4,5 + 2 \times 2,1}{6} = 12,5 \text{ watts.}$$

Ce balai a une largeur de 1,5 cm, donc la puissance, par centimètre de balai pour cette qualité et pour l'apparition des premières étincelles, est de

$$\frac{12,5}{1,5} = 8,35 \text{ w.}$$

Comme ordre de grandeur, elle est analogue à la valeur trouvée par M. Mauduit pour un balai QS₁, savoir 6,4 w, seulement; mais ce dernier balai est plus dur que le balai EG.

Pour l'autre qualité LFC₃BS (cliché 322), on trouve

$$2J = 22 \text{ A}, \quad i_0 = 11,4 \text{ A}, \quad \mathcal{E} = 280 \mu\text{H}, \quad R = 66 \text{ milliohms},$$

$$\epsilon_0 = 3,5 \text{ V}, \quad \epsilon_p = 7,25 \text{ V}, \quad \epsilon_m = 3,15 \text{ V},$$

$$\left(\frac{B}{t_0} \right)_L = 11,4 \frac{7,25 + 2 \times 3,5}{6} = 27,1 \text{ w.}$$

Le balai a une largeur de 1,35 cm; donc, pour la puissance par centimètre, il vient

$$\frac{27,1}{1,35} = 20 \text{ w.}$$

Quant à l'énergie, il suffit de multiplier les résultats précédents par t_0 , le temps pendant lequel existe l'étincelle.

Pour le calcul de t_0 , nous avons, d'après les constantes du collecteur données plus haut,

$$t_0^E = \frac{0,7}{23,1} \times \frac{60\,000}{600 \times 12} = 0,253 \text{ ms (millisecondes)}$$

$$t_0^L = \frac{0,7}{23,1} \times \frac{60\,000}{640 \times 12} = 0,237 \text{ ms.}$$

Donc, par centimètre, on a

$$B_{E1} = 8,35 \times 0,253 = 2,11 \text{ millijoules,}$$

$$B_L = 20 \times 0,237 = 4,75 \text{ millijoules.}$$

D'après ces calculs, on peut remarquer que le balai LFC jouit de la propriété intéressante d'admettre une énergie deux fois plus grande par centimètre de largeur pour des étincelles de même ordre de grandeur.

40. Nous avons cherché aussi la résistance de contact de ces deux balais.

Pour le balai EG, la tension moyenne de passage, la portion tp du cliché 316, est de $\epsilon_m = 1,80 \text{ V}$; pour l'autre balai, on trouve $\epsilon_m^L = 3,15 \text{ V}$.

Comme densité de courant sous le balai, nous avons respectivement

$$j_E = \frac{13}{2,5} = 5,2 \text{ A : cm}^2 \quad \text{et} \quad j_L = \frac{22}{2,5} = 8,7 \text{ A : cm}^2.$$

Si on cherche la résistance surfacique de contact correspondante, on obtient les nombres suivants

$$r_{cE} = \frac{1,8}{5,2} = 0,347 \text{ ohm : cm}^2$$

et

$$r_{cL} = \frac{3,15}{8,7} = 0,360 \text{ ohm : cm}^2$$

comme valeurs théoriques. Ce sont des valeurs du même ordre de grandeur. En réalité, on ne connaît jamais les densités réelles auxquelles les balais travaillent, vu l'allure capricieuse des phénomènes de contact. Il faut observer aussi que ces balais ont à peu près la même résistance de contact, mais l'un est beaucoup plus dur que l'autre et, en outre, ses propriétés sont différentes au point de vue de la commutation. La résistance de contact seule ne peut guère expliquer des différences aussi importantes et il faut admettre que la composition physique et chimique, que nous ne connaissons pas, influe d'une manière importante sur les propriétés trouvées.

41. Comme valeur de la tension caractéristique, conformément à la définition de M. Mauduit, d'après la formule théorique

$$e = \frac{2 \pi J}{T},$$

nous avons les valeurs ci-dessous, pour le courant donnant les premières étincelles.

En calculant T pour chaque cas, nous avons

$$T_E = \frac{17 - 0,7}{23,1} \times \frac{60\,000}{12 \times 600} = 5,9 \text{ ms.}$$

$$T_L = \frac{18 - 0,7}{23,1} \times \frac{60\,000}{12 \times 600} = 5,85 \text{ ms.}$$

17 et 18 mm sont les longueurs respectives des balais.

Pour la tension caractéristique, on a

$$e_E = \frac{13 \times 0,280}{5,9} = 0,615 \text{ v.}$$

$$e_L = \frac{22 \times 0,280}{5,85} = 1,05 \text{ v.}$$

Pour le balai LFC, on trouve bien la valeur d'un volt pour la tension caractéristique, tandis que, pour l'autre, la valeur similaire admissible n'est que 0,6 v. Il s'impose, donc, de déterminer, pour chaque qualité de balai, la valeur correspondante de la tension caractéristique pour les premières étincelles.

Nous avons cherché aussi l'apparition des étincelles que nous avons nommées étincelles nettement visibles. Pour la pression de 250 g:cm², l'apparition de ces étincelles se produit vers 20 A pour le balai EG et vers

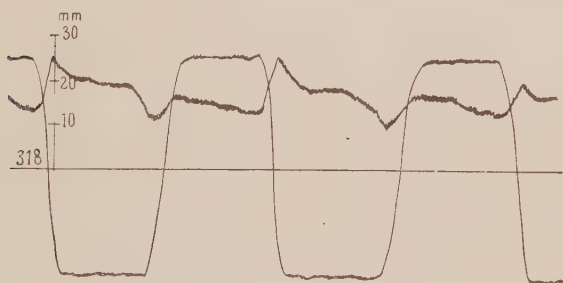


Fig. 36. — Oscillogrammes du courant i et de la tension e avec un balai LFC₃BS (+); $2 I = 16 \text{ A}$, $L = 280 \mu\text{H}$, $r = 66 \text{ milliohms}$, pression = 150 g:cm². Apparition des premières étincelles.

45 A pour l'autre LFC. Les valeurs correspondent à des tensions caractéristiques respectives $e^E = 0,95 \text{ v}$ et $e^L = 2,15 \text{ v}$.

42. Nous avons essayé également de faire varier la pression. Si on prend seulement 150 g:cm², valeur généralement recommandée par les fabricants de charbons, le contact est mal assuré. Nous donnons un seul oscillogramme (fig. 36), cliché 318, qui se rapporte à

un balai LFC₃BS sous la pression indiquée ci-dessus; le courant est de 16 A et on a les premières étincelles.

La courbe de tension montre l'irrégularité frappante du phénomène, surtout quand on compare avec le cliché 322 (fig. 35) qui se rapporte au même balai et également pour les premières étincelles.

La pression nécessaire pour assurer un bon contact doit être supérieure à 150 g:cm². C'est bien ce que M. Mauduit a constaté dans ses travaux sur les contacts. Une insuffisance de pression se manifeste aussi par l'apparition rapide des étincelles. Pour le balai EG avec 150 g:cm², on observe les premières étincelles à 8,5 A, alors que pour 250 g:cm², il faut un courant de 13 A, toutes les autres conditions étant les mêmes.

Pour les étincelles nettement visibles, les différences ne sont pas moins grandes. Avec le balai EG et 150 g:cm², on les trouve pour un courant de 14,5 A, tandis que, avec 250 g:cm², elles ne paraissent qu'à 20 A. La même chose a lieu pour le balai LFC où les valeurs du courant correspondant aux pressions ci-dessus sont respectivement de 24 et 45 A.

B. Observations sur la commutation. — 43. La dynamo que nous étudions H — 100/2, dont la description a été donnée dès le début, comporte six demi-bobines par encoche, donc trois paires de demi-bobines. Nous avons essayé de nous rendre compte si cette disposition de l'enroulement entraîne ou non des différences dans la manière de commuter de chacune de ces trois sections.

M. Mauduit dans son « Traité » (édition, 1922, page 215) écrit que les diverses variables qu'on rencontre ne reprennent la même valeur qu'au bout d'un temps Z/T' où Z' est le nombre de demi-bobines par encoches et T' la durée du déplacement d'une lame.

Nous avons relevé d'abord la tension de section de chacune de ces sections en prenant à l'oscillographe les différences de potentiel entre les bagues A — a, a — b et b — c. De cette façon, d'après la description des connexions que nous avons indiquées, on a photographié les courbes correspondantes qu'on peut voir dans la figure 37 (clichés 238, 239 et 240), les indices du numéro de la figure montrent, dans l'ordre alphabétique, les positions respectives indiquées plus haut.

Ces clichés ont été relevés dans les conditions suivantes:

La dynamo à vide avait une vitesse de 1070 t:mn, l'excitation était indépendante et égale à $i = 0,52 \text{ A}$.

Les oscillogrammes ne présentent pas de différences; d'ailleurs, ils reproduisent tout simplement la forme du champ inducteur qui n'a aucune raison d'être influencée par la présence de plusieurs sections par encoches.

On a relevé aussi les courbes correspondant à la marche en pleine charge. La figure 24 montre, en prenant toujours dans l'ordre alphabétique les indices pour avoir les sections dans l'ordre indiqué plus haut, les oscillogrammes obtenus dans les conditions suivantes: vitesse de la machine à vide 1070 t:mn, ten-

sion à vide 154 v, courant débité 25 A. Dans ce cas, on observe aussi que les courbes sont les mêmes, au moins comme allure. Dans la zone de commutation, en valeur numérique, il est très difficile de faire des différences

parce que les mesures exécutées comportent des erreurs de l'ordre de grandeur des différences observables de sorte que celles-ci perdent toute importance. Il faut, pourtant, remarquer la présence d'une série de dente-

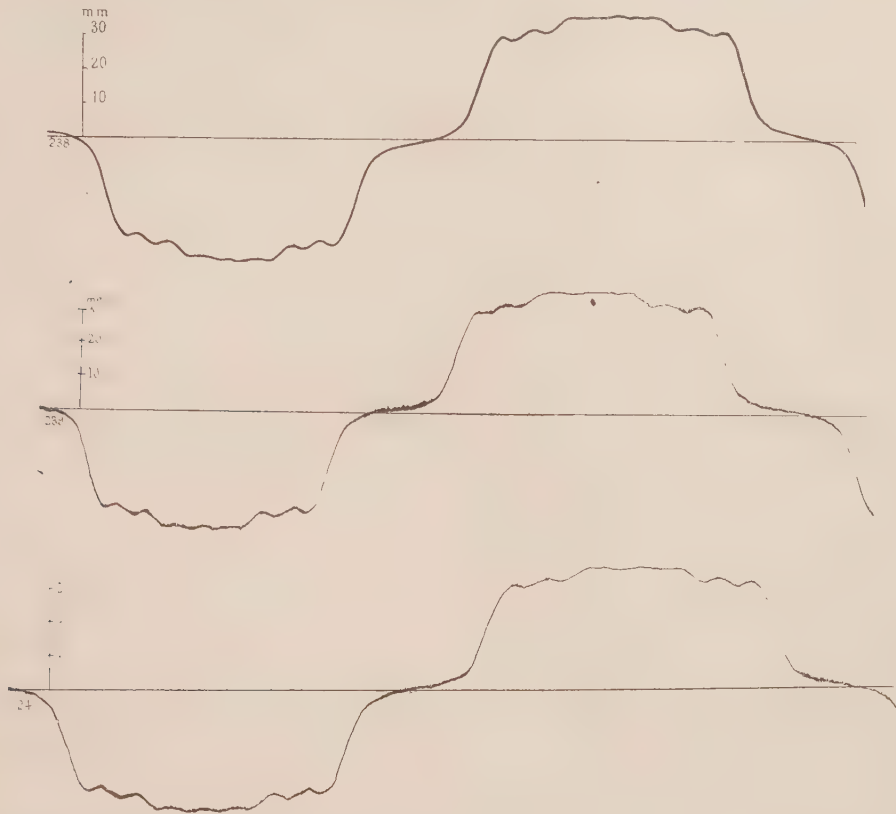


Fig. 37 a, 37 b et 37 c. — Champ de l'inducteur de la dynamo spéciale à vide; $i = 0,52$ A, $n = 1070$ t : mn. a (cliché 238), tension de section entre les bagues A et a; b (cliché 239), tension de section entre les bagues a et b; c (cliché 240), tension de section entre les bagues b et c.

lures sur la courbe; ces dentelures sont dues à la présence des encoches et offrent une certaine régularité.

Pour mieux voir s'il existe des différences et des phénomènes périodiques dans ce cas, on a utilisé un autre moyen d'étude, représenté dans la figure 38. On

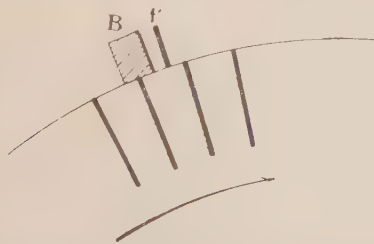


Fig. 38. — Disposition du petit frotteur f sur le collecteur, en face du balai B.

a pris, pour l'examiner à l'oscillographe, la tension entre le balai positif et un petit frotteur auxiliaire qui est fixé sur le porte-balai — bien entendu isolé de celui-ci — de façon à toucher la lame qui est en train

de quitter le balai. Pour cela le frotteur est décalé en avance du balai de 2 à 3 mm et il prend la tension de coupure à la fin de la période de commutation. Dans la figure 38, on a exagéré la largeur des lames pour mieux en montrer la disposition.

On a fait tourner la machine à une vitesse très réduite, à 180 t : mn. La dynamo fonctionnait à vide. Dans ces conditions, on a enregistré l'oscillogramme 280 (figure 39), en utilisant le maximum de sensibilité. La différence de potentiel a été prise entre le balai et le petit frotteur.

En examinant cette courbe, on constate une périodicité de trois très nette; les trois sections correspondent exclusivement à une période entière, après laquelle la position des dents se retrouve la même sous l'inducteur.

Le temps de passage d'une lame sous le balai, qui dans cette expérience a la largeur d'une lame, pour une vitesse de 180 t : mn et 72 lames, est

$$T' = \frac{60}{180 \times 72} = 4,63 \text{ ms,}$$

alors qu'en général, pour la vitesse habituelle de 1100 t: mn, le même temps est

$$T = \frac{60}{1100 \times 72} = 0,76 \text{ ms.}$$

Le temps nécessaire pour que les trois lames passent sous le balai sera

$$3T' = 3 \times 4,63 = 13,9 \text{ ms.}$$



Fig. 39. — Différence de potentiel entre le balai et le petit frotteur auxiliaire. La dynamo marche en génératrice à vide, $n = 180 \text{ t: mn.}$

Il s'ensuit que la présence des trois paires de demi-bobines par encoche entraîne, à vide, d'après ce que M. Mauduit écrit, une périodicité de $Z' T' = 3 \times 4,63 = 13,9 \text{ mn}$ pour la reproduction des mêmes phénomènes. En même temps, on observe, d'après les courbes données, que l'influence de bobines n'est pas trop importante pour la marche de la machine dans ses conditions normales; aussi n'insistons-nous pas davantage sur cette question.

44. Au § 27 en étudiant la relation qui définit la tension caractéristique e , nous avons supposé constante l'inductance $\mathcal{L}$ de la section. Les courbes que nous avons relevées pour examiner la variation de la tension e , présentaient des formes prévues dans cette hypothèse. On peut donc l'admettre.

Le calcul de cette quantité $\mathcal{L}$ est très difficile. Nous avons montré d'ailleurs dès le début de ce travail, en examinant les diverses théories sur la commutation, les divergences très grandes qui existent entre les auteurs quant à la définition de ce coefficient. Ceux qui adoptent la même définition donnent d'ailleurs des méthodes différentes de calcul; tous ces calculs sont assez difficiles à cause de la présence du fer qui fait varier $\mathcal{L}$ d'après son état de saturation.

Les mesures que nous avons faites par la méthode oscillographique sur les valeurs de la tension caractéristique vont nous permettre de donner une idée de l'ordre de grandeur du coefficient $\mathcal{L}$ pour la dynamo étudiée.

On sait que la relation qui lie e à $\mathcal{L}$ est la suivante

$$e = \frac{2 \mathcal{L} J}{T}; \text{ d'où } \mathcal{L} = \frac{e T}{2 J},$$

où J est le courant qui traverse une section et T , le temps de commutation.

Si e est donnée en volts: T , en secondes et J , en ampères, $\mathcal{L}$ sera calculée en henrys.

La durée théorique de la commutation T dépend de la largeur du balai et du nombre de lames qu'il peut couvrir. Dans ce cas, avec une largeur de 12,5 mm et des lames dont le pas est 5,07 mm, le balai peut couvrir

Le papier de l'oscillographe se déroule d'une manière à peu près constante, le tambour étant entraîné par un petit moteur; la vitesse de déroulement est égale à 3 ms approximativement. Donc, 1 cm de l'oscillogramme représente un temps de déroulement égal à 3 ms. Sur la photographie, en prenant une moyenne de plusieurs périodes, on peut tabler sur une valeur approchée d'environ 5 cm; il en résulte qu'une période correspond à 15 m: s, valeur très approchée de celle déduite par voie théorique.

à la fois $\frac{12,5}{5,07} = \sim 2,5$ lames. Le mica qui sert d'isolant entre les lames a une épaisseur de 0,5 mm; puisque le balai peut couvrir en même temps deux isolants, il reste comme largeur utile,

$$12,5 - 2 \times 0,5 = 11,5 \text{ mm.}$$

Nous aurons pour le temps de commutation

$$T = \frac{12,5 - 1}{5,07} \times \frac{60\,000}{72 \times 1\,100} = 1,72 \text{ ms.}$$

Pour différentes valeurs du courant total $I = 2J$, nous aurons

$$2J = 7 \text{ A}, \quad e = 0,75 \text{ V.}$$

$$\mathcal{L}_7 = \frac{0,75 \times 1,72}{7} = 0,184 \text{ mH} = 184 \mu\text{H}$$

$$2J = 11,5 \text{ A}, \quad e = 1,2 \text{ V}, \quad \mathcal{L}_{11,5} = \frac{1,2 \times 1,72}{11,5} = 179 \mu\text{H},$$

$$2J = 15 \text{ A}, \quad e = 1,47 \text{ V}, \quad \mathcal{L}_{15} = \frac{1,47 \times 1,72}{15} = 169 \mu\text{H},$$

valeurs assez approchées, qui montrent que le coefficient $\mathcal{L}$ est une constante de la section, qui dépend seulement des données constructives.

C. Critérium d'une bonne commutation. —

45. Nous avons eu l'occasion de dire quelques mots sur la grande importance que présente, pour la construction des machines à collecteur, la connaissance d'un juste critérium qui puisse fournir les indications nécessaires sur la qualité de la commutation, d'après les seules données d'un projet de construction.

Nous examinerons quelques-unes seulement de ces formules, en les appliquant autant que possible au cas de la machine étudiée.

Rüdenberg, en étudiant la commutation, propose comme critérium

$$\frac{L_s}{TR_n} < 1 + \frac{L_s}{L_n},$$

où L_s est la self-induction apparente de la bobine mise en court-circuit;

L_n , la self-induction apparente du circuit dérivé;

T , le temps de commutation;

R_n , la résistance de contact.

Cette condition est, on peut dire, inapplicable. La définition donnée pour les coefficients L_s et L_n ne permet pas le calcul effectif, car le calcul de ces inductances est une opération très délicate qui nécessite, comme première condition, une définition aussi précise que possible.

En outre, l'auteur fait entrer la quantité R_n , qui représente la résistance de contact. On sait, d'après les travaux de M. Mauduit, combien ces résistances sont capricieuses; c'est donc une pure illusion de s'imaginer qu'on pourra prévoir les conditions de commutation d'une machine en utilisant une pareille quantité, qu'on ne peut déterminer d'une manière précise et qui varie avec les moindres changements de conditions.

Pichelmayer recommande comme critérium d'une bonne commutation la formule

$$e_s = 2 v w . A L_a \zeta . 10^{-8} \text{ v,}$$

où v est la vitesse périphérique de l'induit;

w , le nombre de spires entre deux lames;

A , la densité linéaire du courant;

L_a , la longueur du fer de l'induit;

ζ , une constante pratique, représentant le nombre de lignes de forces du flux lié au faisceau de fils en commutation, pour un ampère et pour un centimètre de longueur du fer.

A l'occasion du calcul du champ $\mathcal{B}$, qui entre en jeu dans la commutation et qui, forcément, est compris dans cette formule, nous avons vu que la méthode que M. Pichelmayer indique donne des résultats qui sont assez loin de la réalité; donc cette formule comporte la même erreur. L'auteur spécifie entre quelles limites doit se tenir e_s pour que la commutation soit acceptable sans pôles auxiliaires.

M. Weiler ⁽²⁶⁾ étudie la tension de réactance et ensuite développe la méthode d'application, qui peut servir comme critérium d'une bonne commutation.

Pour la tension de réactance, l'auteur donne la formule

$$e = \lambda i w^2 l \frac{v_k}{2B} . 10^{-7} \text{ v,}$$

où i est le courant dans une dérivation d'induit;

w , le nombre de spires par bobine;

l , la longueur active du fer, en centimètres;

v_k , la vitesse périphérique du collecteur, en centimètres par seconde;

B , la largeur du balai, en centimètres;

$\lambda = 0,8 \times$ flux par centimètre de longueur du fer pour un ampère dans la spire en court-circuit ou

$$\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4,$$

λ_1 étant le flux de l'encoche à partir de la partie supérieure du conducteur jusqu'à la tête de la dent;

λ_2 , le flux de l'encoche en dessous de la partie supérieure du conducteur;

λ_3 , le flux de la tête de la dent;

λ_4 , le flux de la portion qui se trouve dans l'air.

Pour calculer λ , l'auteur utilise les formules :

$$\lambda_1 = \frac{h_1}{b} \alpha \text{ pour le cas où le balai met en court-circuit}$$

les spires d'une seule encoche;

$$\lambda_2 = 1,26 \frac{h_2}{3b} \alpha \text{ dans la même hypothèse;}$$

où b est la largeur de l'encoche;

h_1 , la hauteur de l'encoche correspondant à la définition de λ_1 ;

h_2 , la hauteur de l'encoche correspondant à la définition de λ_2 ;

α , le nombre des lames du collecteur par encoche;

$$\lambda_3 = f \left[\frac{z}{t} 2\beta \right];$$

dans cette expression on calcule f d'après une courbe en fonction du nombre d'encoches par pôle;

z , est la largeur tangentielle d'une dent;

t , la largeur tangentielle d'une dent et d'un creux;

β , le nombre des bobines mises en court-circuit par le balai

$$\lambda_4 = \beta \times \frac{1,25 \tau}{l} \times 0,2 \log \left(\frac{1,25 \tau}{u/2} \right),$$

où τ est le pas polaire;

u , la périphérie des conducteurs mis en courts-circuits, arrangés l'un à côté de l'autre.

Pour la dynamo spéciale, on a

$$h_1 = 3,2 \text{ mm, } h_2 = 18 \text{ mm, } b = 9,5 \text{ mm,}$$

$$\alpha = 3, f = 1,5 \text{ (d'après la courbe),}$$

$$z = 15,3 \text{ mm, } t = 20,8 \text{ mm, } \beta = 3, \tau = 25 \text{ cm,}$$

$$l = 15,5 \text{ cm, } B = 1,4 \text{ cm,}$$

$$u = 19,2 \text{ cm, } i = 12,5 \text{ A, } w = 4,$$

$$v_k = 920 \text{ cm : s (pour } n = 1100 \text{ t : mn);}$$

donc

$$\lambda_1 = \frac{3,2}{9,5} \times 3 = 1,01, \quad \lambda_2 = 1,26 \times \frac{18}{3,95} \times 3 = 2,38,$$

$$\lambda_3 = 1,5 \left[\frac{15,3}{20,8} \times 2 \times 3 \right] = 6,6,$$

$$\lambda_4 = 3 \times \frac{1,25 \times 25}{15,5} \times 0,2 \log \frac{1,25 \times 25}{19 \cdot 2/2} = 0,615,$$

$$\lambda = 1,01 + 2,38 + 6,6 + 0,61 = 10,6,$$

$$e = 10,6 \times 12,5 \times 4^2 \times 15,5 \times \frac{920}{2 \times 1,4} \times 10^{-7} = 1,08 \text{ v.}$$

Pour examiner la qualité de la commutation, l'auteur propose de chercher la valeur de l'expression

$$k e . 1,18 \frac{A W_a}{A W_{L+Z}}$$

où k est une constante donnée par un tableau en fonction du nombre des lames que le balai couvre ;

$A W_a$, le nombre d'ampères-tours de l'induit dans la zone neutre ;

$A W_{L+Z}$ le nombre d'ampères-tours correspondants pour l'entrefer et les dents qui se trouvent sous les pôles principaux, valeur qui doit rester comprise entre 2,4 et 2,8 pour qu'il n'y ait pas d'étincelles au collecteur.

Dans le cas qui nous intéresse, on a

$$A W_a = 3\,600, \quad A W_{L+Z} = 2\,400 \text{ (environ),}$$

$K = 1,65$ pour un balai qui couvre trois lames.

L'expression devient

$$1,65 \times 1,08 \times 1,18 \times \frac{3\,600}{2\,400} = 2,92.$$

D'après ce critérium, on dépasse légèrement la limite exigée pour la marche sans étincelle. Nous avons vu que, pour un courant très inférieur au courant normal, les crachements sont très violents ; donc cette formule, dans ce cas, donne des valeurs un peu faibles. A notre avis, le fait provient de la faible valeur obtenue pour e . En effet, on trouve, pour le courant normal de 25 A, seulement 1,08 v, alors que, d'après l'oscillogramme, la valeur moyenne de la tension de section dépasse de beaucoup 1 v et avant d'atteindre même le fonctionnement en demi-charge. Certainement, les erreurs proviennent des formules qui donnent le coefficient λ , lequel, au fond, cache toute la difficulté qu'on rencontre dans les calculs de commutation.

Si on considère la vitesse angulaire pour laquelle la dynamo a été construite, $n = 1\,650$ t : mn, au lieu de la valeur 2,92 on arrive à 4,37, ce qui indique la nécessité des pôles auxiliaires.

M. Guery (²²), en discutant le critérium d'une bonne commutation proposé par M. Mauduit et que nous examinerons après, propose lui aussi un moyen de prévoir la qualité d'une commutation.

Il aboutit à la relation

$$\frac{2 q . N_3^2 l \times 10^{-8}}{60 m} \left(b_1 + \frac{\pi}{\beta'} \right) n I \leq \epsilon_\gamma,$$

dans laquelle l est la longueur axiale de l'armature ;

q , le nombre de lames au collecteur ;

N_3 , le nombre de spires par bobine ;

m , le nombre de paires de circuits en parallèle entre les balais ;

b , un facteur égal à 1,2 ;

πl , la perméance totale du circuit de dispersion de la section en commutation ;

β' , le nombre de lames couvertes par un balai ;

n , la vitesse angulaire en tours par minute ;

I , le courant total ;

ϵ_γ a une valeur définie pour toutes les conditions du contact balai-collecteur.

L'auteur envisage le critérium d'une bonne commutation à un autre point de vue, en s'occupant spécialement du nombre de lames au collecteur.

On arrive à la relation

$$\epsilon_\gamma = \frac{4}{\beta(1+\beta'')} \left(b_1 + \frac{\pi}{\beta'} \right) \frac{k m}{\beta q} E; \quad (1)$$

d'où on déduit

$$q = K \frac{mkE}{\beta} \quad \text{ou} \quad K = \frac{q}{m} \cdot \frac{\beta}{k} \cdot \frac{1}{E},$$

avec

$$K = \frac{4}{\beta(1+\beta'')} \left(b_1 + \frac{\pi}{\beta'} \right) \frac{1}{\epsilon_\gamma} \quad (2)$$

β est l'induction moyenne dans l'entrefer, déterminée en divisant le flux utile par la moyenne des sections du fer en regard, dans l'angle polaire ;

β , le rapport de l'arc polaire au pas polaire ;

β'' , le rapport du plein de la dent au pas de la denture ;

E , la tension normale de la machine.

k , le nombre d'ampères-fils par centimètre de développement périphérique de l'induit ;

Un critérium de bonne commutation, d'après l'auteur, serait indiqué par les valeurs de K et M . Guery estime que celle-ci doit être d'environ 12.

Nous avons appliqué cette formule pour la dynamo spéciale H — 100/2. Dans ce cas on a les valeurs :

$\pi = 4$ (calculé d'après les formules de perméance indiquées dans le traité d'Arnold) ;

$$\beta = \frac{1,45 \times 10^6}{\frac{1}{2} \left(15,5 \times 17,5 + 1,53 \times 15,5 \times \frac{120}{360} \times 24 \right)} = 6\,300 \text{ gauss,}$$

$q = 72$ lames, $N_3 = 4$ spires, $l = 15,5$ cm, $m = 1$, $b_1 = 1,2$ (d'après F. Guery), $\beta' = 2,5$ lames,

$$n = 1\,650 \frac{1}{2} \text{ t : mn, } I = 25 \text{ A, } \beta = 0,07, \beta'' = \frac{1,53}{2,08} = 0,735.$$

Nous aurons de la relation (1)

$$\epsilon_\gamma = \frac{4}{0,7(1+0,735)} \left(1,2 + \frac{4}{2,5} \right) \frac{144}{6\,300} \times \frac{1}{72} \times 147 = 0,427.$$

K a la valeur

$$K = \frac{72}{1} \times \frac{6.300}{144} \times \frac{1}{147} = 21,4.$$

Nous avons pris pour la force électromotrice aux bornes $E = 147$ v, valeur correspondant à 1 100 t : mn (220 v pour 1 656 t : mn).

Ce critérium indique bien, par la valeur 21 trouvée pour K , que la commutation à pleine charge est mauvaise.

Mais, ce qu'il faut remarquer, c'est que la valeur ε_γ obtenue par le calcul développé plus haut est une valeur beaucoup trop faible par comparaison avec celle que nous avons trouvée par mesure directe. En effet, sur la figure 28, on observe, pour un courant de 15 A dans l'induit, une tension moyenne de section de 1,48 v, tandis que par la formule donnée, pour le même courant, on ne trouve que 0,257 v. Nous avons montré d'ailleurs à une autre occasion la façon tout à fait arbitraire d'adopter la valeur 1,2 pour le coefficient b_1 , qui entraîne une grosse diminution de la tension ε_γ calculée. Pour la dynamo que nous étudions, la valeur de b_1 est d'environ 4,6, donc 3,8 fois plus grande que celle indiquée par l'auteur.

M. Mauduit, dans son cours (p. 225), préconise comme critérium de bonne commutation le suivant :

Il faut calculer la tension caractéristique ε_γ donnée par la relation

$$\varepsilon_\gamma = 0,04 (10 \xi L + \gamma_e \lambda_s) z f / \omega^2$$

avec

$$\xi = \frac{0,05}{1 - \beta}, \quad \gamma_e = 0,46 \left(\log \frac{l_s}{d_s} - 0,2 \right) \quad \text{et} \quad \lambda_s = \frac{l_s}{\omega}$$

où L est la longueur du fer de l'induit exprimée en décimètres;

z , le nombre de spires qui constituent une bobine;
 x , le nombre d'ampères-fils par centimètre de périphérie de l'induit, exprimé en centaines;

ω , le pas polaire, en décimètres;

$f = \frac{np}{60}$, la fréquence d'aimantation de l'induit, en centaines;

n , le nombre de tours par minute;

p , le nombre de paires de pôles;

β , le rapport entre l'arc polaire et le pas polaire;

l_s , la longueur d'une tête de bobine;

d_s , le diamètre du cercle circonscrit à la section du paquet de fils constituant la bobine.

Si la valeur trouvée pour ε_γ dépasse la valeur d'environ 1 v, il faut introduire les pôles auxiliaires; dans l'autre cas, la dynamo devrait fonctionner sans crachement jusqu'à la charge maximum et la pleine vitesse.

La tension caractéristique ε_γ est formée de deux parties : l'une ε'_γ produite par le flux résultant dans le bloc de fer de l'induit et la seconde ε''_γ due aux flux de fuites dans les têtes de bobines.

Pour la dynamo spéciale, on a

$L = 1,55$ dm, $z = 4$ spires, $x = 1,44 \times 10^2$ ampères-fils par centimètre, $\omega = 2,5$ dm,

$$f = \frac{1\,100 \times 1}{60} = 0,183 \times 10^2, \quad \beta = 0,7,$$

$$l_s = 27 \text{ cm}, \quad d_s = 0,8 \text{ cm}.$$

On remplace ces valeurs dans les formules données plus haut

$$\xi = \frac{0,05}{1 - 0,7} = 0,166\bar{5}, \quad \gamma_e = 0,46 \left(\log \frac{27}{0,8} - 0,2 \right) = 0,615,$$

$$\lambda_s = \frac{27}{25} = 1,08,$$

$$\varepsilon_\gamma = 0,04 (10 \times 0,166\bar{5} \times 1,55 + 0,615 \times 1,08)$$

$$\times 4 \times 1,44 \times 0,183 \times 2,5^2 = 0,855 \text{ v.},$$

pour la vitesse de 1100 t : mn. Si on considère 1650 t : mn, la tension caractéristique devient 1,28 v.

D'après le critérium indiqué, on constate que, pour la marche en vitesse normale et à pleine charge, les pôles auxiliaires sont nécessaires, la tension caractéristique dépassant 1 v; mais, pour la vitesse de 1100 t : mn, les pôles auxiliaires ne sont pas exigés d'après ce critérium.

Pour faire une comparaison entre les valeurs de la tension caractéristique correspondant à différentes charges, données par la formule ci-dessus et la tension moyenne, il faut examiner les résultats groupés dans le tableau D.

Dans ce tableau, nous avons donné les valeurs calculées

TABLEAU D

COURANT I ampères	ε_γ CALCULÉE volts	ε'_γ MESURÉE (MARCHE EN GÉNÉRATRICE) volts
2,4	0,082	0,34
6,3	0,215	0,7
7	0,24	0,75
10	0,34	1,05
12,5	0,425	1,28
15	0,51	1,46

culées pour la tension caractéristique ε_γ à 1100 t : mn et les valeurs mesurées à l'oscillographe pour la tension moyenne de la section, la dynamo fonctionnant en génératrice à cette vitesse. On observe tout de suite que les valeurs mesurées sont beaucoup plus fortes que celles calculées et le rapport est d'environ trois. Cet examen du tableau nous explique les faits constatés expérimentalement que la machine crache violemment pour une charge assez réduite, alors que d'après l'indication de ε_γ elle ne le devrait pas. La tension ε_γ calculée par la formule que nous avons vue a des valeurs trop faibles par rapport à celles mesurées directement. Il en résulte que, pour avoir de bonnes indications, il faut réduire la valeur de la tension caractéristique maximum qu'on admet pour la marche sans pôles auxiliaires.

46. Nous avons constaté aussi et nous l'avons déjà montré, que le moteur présente une légère amélioration dans la manière de commuter, par rapport à la génératrice. Pour la commutatrice, l'amélioration est plus notable encore.

Pour se rendre bien compte de toutes ces questions, il faut analyser le tableau C (p. 34), dans lequel on a inscrit, pour chaque valeur du courant, les tensions caractéristiques ϵ , correspondantes, calculées ou mesurées, la vitesse étant $n = 1\ 100\ t : mn$. Il faut rappeler que, dans ce tableau, on a inscrit dans les autres colonnes les tensions de pointe qu'on a mesurées à l'oscillographe pour les balais EA et LFC. Les tensions qui correspondent à l'apparition des premières étincelles sont soulignées d'un trait plein; celles qui correspondent aux étincelles nettement visibles sont soulignées en pointillé. En plus, nous avons donné les valeurs mesurées de ϵ_r , au moyen de la tension de section, pour le fonctionnement en génératrice, moteur et commutatrice.

On observe que les premières étincelles se manifestent, pour les deux sortes de balais et pour les deux premiers fonctionnements, à peu près pour la même valeur de la tension caractéristique de pointe, qui est de l'ordre de grandeur de 0,8 à 0,9 v. Le crachement, au contraire, paraît pour des tensions de pointe qui diffèrent d'après les balais employés. Les valeurs sont plus petites avec des balais LFC qu'avec des balais EG. Mais l'apparition du crachement est très difficile à apprécier, même quand on a une assez grande habitude et on ne peut donc compter sur la deuxième observation que d'une manière assez approximative. Pourtant cette question est très importante parce qu'elle règle les valeurs de la tension caractéristique ϵ_r calculée, qu'on doit admettre comme limites du fonctionnement sans étincelles.

Nous ferons une distinction nette entre les marches en génératrice, moteur ou commutatrice et donnerons dans chaque cas la valeur limite au-dessus de laquelle il faut employer des pôles auxiliaires. D'autre part, nous croyons que la qualité du balai employé n'est pas indifférente dans la détermination de ces limites et, à notre avis, il faudrait étudier chaque sorte de balai par le même procédé pour qu'on soit vraiment en mesure d'indiquer ses propriétés au point de vue de la commutation.

A notre avis, il faut adopter comme maxima admissibles de la tension caractéristique ϵ_r (calculée par la formule de M. Mauduit) dans une machine à courant continu sans pôles auxiliaires les valeurs suivantes :

TABEAU E

	GÉNÉRATRICE	MOTEUR	COMMUTATRICE
EG3150.....	0,3	0,35	0,5
LFC ₃ BS.....	0,6	0,7	0,9

Dès que ces valeurs sont dépassées, les pôles auxiliaires sont absolument nécessaires pour éviter un crachement nuisible au bon fonctionnement de la machine.

47. La défectuosité d'une commutation se manifeste par l'apparition au collecteur d'étincelles se produisant entre le balai et la lame qui le quitte. Elles semblent analogues à un arc et nécessitent au moins deux éléments principaux : un minimum de tension, qui varie d'après les électrodes employées et un minimum d'énergie mise en jeu. Si l'une de ces conditions n'est pas réalisée, l'étincelle ne peut pas se produire.

Dans la commutation d'une dynamo, pour évaluer l'énergie mise en jeu, dans la période finale, il faut utiliser la section artificielle employée par M. Mauduit, qui permet de se rendre compte de l'importance du courant qui circule dans la bobine pendant le court-circuit. Pour évaluer la tension entre balai et collecteur au moment de la séparation du contact, nous avons employé le frotteur auxiliaire (fig 38). Plus exactement le frotteur étant un peu en avant dans le sens du mouvement il ne donne pas la tension juste au moment de la coupure, mais la tension dans la période finale de commutation. Cet élément est très intéressant, parce que c'est un de ceux qui règlent la formation des étincelles. D'après les mesures faites pour les deux balais étudiés, il semble que cette valeur ne doit pas dépasser en pointe environ 1,2 v; pour les valeurs plus élevées le crachement devient nuisible. Il nous semble que les premières étincelles paraissaient pour une valeur d'environ 0,9 v.

En considérant les étincelles de la commutation comme des arcs électriques, en se rapportant aux autres conditions qui favorisent leur formation, on trouve que la chaleur joue un rôle très important; elle provoque la formation de l'arc pour des tensions de plus en plus petites entre les électrodes. Le fait est bien confirmé en pratique : dans les mêmes conditions, si le collecteur est chauffé, les étincelles sont beaucoup plus fortes que dans le cas du collecteur froid.

Une des causes qui produit l'échauffement du collecteur, outre la circulation du courant, est le frottement entre le collecteur et les balais. On conçoit immédiatement l'intérêt d'avoir des balais présentant un faible coefficient de frottement, donc une faible dureté. A ce point de vue, les balais LFC présentent une supériorité nette sur les balais EG. En effet, les premiers ont la dureté 1 (ils rayent le talc et sont rayés par celui-ci), tandis que les secondes ont une dureté comprise entre 2 et 3 (ils rayent le gypse et sont rayés par le calcaire). Mais, dans la même série, les balais LFC par exemple, la différence d'échauffement se fait sentir quand on passe d'un balai au suivant. A la plate-forme d'essais de la Société alsacienne de Constructions mécaniques de Belfort, on a fait un essai d'échauffement sur un moteur de 150 ch à très grande vitesse (5 000 t : mn). Pendant l'essai le courant était 1060 A, courant normal du moteur; la durée de l'essai était d'un quart d'heure (le moteur a été construit pour une marche intermit-

tente et de très courte durée). Le collecteur est du type radial. On a essayé d'abord les charbons LFC_2 ; ceux-ci on produit un échauffement moyen de $32^{\circ} 6 \text{ C}$; on a ensuite utilisé les balais LFC_{47} ou LFC_{3a} ; l'échauffement moyen a été de 39° C . On observe donc une différence d'échauffement de $6^{\circ} 4 \text{ C}$ ou 20 pour 100 pour les balais de la même famille, séparés par une seule espèce. les balais LFC_3 ; les balais LFC_2 sont moins durs que

les balais LFC_{47} , sans qu'il existe cependant une aussi grande différence de dureté qu'entre les familles LFC et EG , dont il a été question précédemment.

Des essais d'échauffement sur des bagues avec des charbons de ces deux séries, essais exécutés à la Société alsacienne de Constructions mécaniques et qui nous ont été communiqués, ont donné des résultats analogues. Dans le tableau F ci-joint :

TABLEAU F

Essai à vidé pendant 4 h, balais LFC_3 , échauffement moyen.....							11° C
EG.....							19°
1800 A	essai de	2 h	—	LFC_3	—	—	37°
1450 A	—	—	—	EG	—	—	$40^{\circ} 5$
1800 A	—	5 h	—	LFC_3	—	—	48°
1450 A	—	—	—	EG	—	—	$51^{\circ} 2$

on peut voir que les balais EG produisent des échauffements plus forts que ceux du type LFC_3 pour des courants plus faibles, les autres conditions restant les mêmes.

De l'exposé de ces considérations, on peut conclure que des balais plus tendres peuvent être plus avantageux dans la commutation ; le fait que leur résistivité est plus faible n'est point nuisible d'après les essais dont les résultats ont été examinés plus haut et indique en même temps qu'une résistance de contact élevée n'améliore pas de la façon dont on le croit généralement le fonctionnement d'une machine à courant continu au point de vue commutation. Par conséquent, l'import-

tance de la chute de tension au contact, qui est plus forte dans le cas des balais EG , n'a pas l'importance que les anciennes théories lui accordaient.

On reproche aux balais tendres leur grande usure, qui entraîne un changement fréquent des charbons. Evidemment, c'est une difficulté au point de vue frais d'exploitation, mais, à notre avis, tous ces frais peuvent être compensés par la qualité meilleure de la commutation, qui évite des frais beaucoup plus importants dus à l'usure du collecteur. En effet, le crachement au collecteur produit, d'une part, la piqure des lames et, d'autre part, à cause de l'échauffement exagéré provoqué par les étincelles, une déformation possible du collecteur.

CHAPITRE IV

Etude de la commutation avec pôles auxiliaires

A. Introduction. — 48. Nous avons vu, en examinant les critères d'une bonne commutation qu'au dessus d'une certaine valeur de la tension caractéristique, le fonctionnement de la machine n'est plus possible, sans étincelles nuisibles au collecteur.

Cet inconvénient a attiré l'attention des électriciens, dès le début de la production de l'énergie électrique. Pour y remédier, on a employé d'abord le décalage des balais dans un sens convenable de manière à créer, dans la section en commutation, une force électromotrice de sens contraire et de valeur égale à celle qui prend naissance, par suite de l'inversion du courant. Ce système présente de graves inconvénients ; d'après les théories bien connues, on introduit ainsi une réaction antagoniste qui a comme conséquence un affaiblissement du champ inducteur, ce qui entraîne une chute notable de la différence de potentiel aux bornes de la génératrice. Pour compenser cette chute de tension, il faut augmenter le nombre des ampères-tours de l'inducteur, ce qui occasionne une dépense supplémentaire et diminue le rendement de la machine.

Dans un moteur, une variation de la charge entraîne une variation du flux résultant et, par conséquent, de la vitesse.

D'autre part, dans les moteurs réversibles, on est obligé de caler les balais rigoureusement à la ligne neutre, par suite de l'impossibilité de modifier le calage pour chaque variation du sens de rotation de la machine.

Un autre inconvénient réside en ce fait, que le calage des balais doit varier avec la charge, réglage dont la réalisation pratique est presque impossible.

On évite ces inconvénients par l'emploi des pôles auxiliaires.

Plusieurs auteurs revendiquent l'honneur de l'invention des pôles auxiliaires. Il semble que ce soit Mengès qui ait imaginé le premier les pôles auxiliaires et que ce soit Picou qui en ait réalisé la conception sur une première machine en 1889.

Les pôles auxiliaires ou pôles de commutation sont des pôles étroits disposés à chaque ligne neutre, au milieu de l'intervalle interpolaire, ayant pour but de créer une force électromotrice convenable dans la section en court-circuit ; ils sont munis d'un enroulement parcouru par le courant principal.

Sur le rôle des pôles auxiliaires, il y a eu de vives discussions, dont M. Mauduit a exposé le développement dans sa thèse. En discutant les différentes opinions, cet auteur fait les critiques correspondant à chacune d'elles et donne une explication complète du fonctionnement.

Les pôles auxiliaires sont prévus pour annuler et renverser même le champ de l'induit dans la zone de commutation : on les munit, donc, d'abord d'un nombre d'ampères-tours égaux à ceux de l'induit pour détruire l'action de ces derniers ; puis, on ajoute des ampères-tours supplémentaires pour produire dans cette zone un flux inverse du flux normal de l'induit, qui donne naissance dans les bobines en court-circuit à une force électromotrice égale et opposée à celle qui est engendrée dans ces bobines par les divers flux de fuites, c'est-à-dire par les flux passant en dehors du circuit principal, tels que les flux d'une dent à sa voisine et surtout les flux dans les têtes de bobines.

Lorsqu'on utilise les pôles auxiliaires, les balais doivent être calés à la ligne neutre théorique, ce qui fait disparaître les inconvénients signalés plus haut ; mais la distorsion du champ en dehors de la zone de commutation subsiste toujours et on sait que, pour l'éliminer, il faut employer les enroulements de compensation.

L'introduction des pôles auxiliaires dans la construction des machines à courant continu a été très heureuse, mais il faut ajouter que le calcul exact du nombre des ampères-tours nécessaires est assez délicat à cause de la complexité des phénomènes qui entrent en jeu : qualités magnétiques des noyaux polaires, forme de la pièce polaire — qui règle dans de larges limites l'importance des fuites de toutes sortes — qualité des charbons employés, etc. Nous examinerons plus en détail ce calcul un peu plus tard.

B. Comparaison entre les balais EG3450 et LFC₃BS. — 49. Nous allons examiner d'abord la courbe de distribution du champ dans l'entrefer d'une machine munie de pôles auxiliaires.

La figure 40 (cliché 297) représente la courbe relevée sur la dynamo spéciale H-100/2, de la tension de section à vide, sans excitation ni dans les pôles princi-

paux, ni dans les pôles auxiliaires, c'est-à-dire sous l'influence seule du magnétisme rémanent ; la vitesse était de 1 100 t : mn et la tension aux bornes de 4,25 v.

Le fait caractéristique se manifeste dans la zone neutre, où la courbe présente une forme arrondie qu'on ne trouve pas dans les mêmes conditions sans



Fig. 40. — Oscillogramme de la tension de section de la dynamo spéciale H-100/2 à vide, sans excitation, $n = 1\,100\text{ t : mn}$, $E_0 = 4,35\text{ v}$. Les pôles auxiliaires sont à leur place, sans être parcourus par le courant.

pôles auxiliaires. La présence de ces pôles, par la simple influence de leur masse de métal magnétique, entraîne donc une modification assez importante dans la distribution du champ dans cette zone.

50. Dans un deuxième essai, on a excité seulement le système inducteur (dans tout ce chapitre nous dirons système inducteur pour le bobinage shunt ordinaire des pôles principaux). La figure 41 montre le



Fig. 41. — Oscillogramme de la tension de section de la dynamo spécial H-100/2, $n = 1\,100\text{ t : mn}$, $E_0 = 120\text{ v}$ (excitation normale). Les pôles auxiliaires sont à leur place sans être parcourus par le courant.

cliché 298, qui représente la tension de section à vide, à 1 100 t : mn et sous une tension totale de 120 v.

Cette courbe offre une grande analogie avec celle de la figure 37 tracée sans pôles auxiliaires, avec toutefois une petite différence, peu marquée d'ailleurs dans la région interpolaire et évidemment due à la présence des pôles de commutation. L'influence semble beaucoup moindre que dans le cas précédent, paragraphe 49, mais c'est une apparence due à ce que la différence de sensibilité est très grande entre ces deux clichés. Dans le premier, l'ordonnée moyenne représente 5 v, dans le deuxième, 120 v. Si on compare les valeurs obtenues en tenant compte de ces indications, on trouve bien les mêmes déformations. Comme il fallait s'y attendre, dans l'intervalle compris sous la pièce polaire, c'est bien la même forme qui se reproduit.

51. Passons aux essais en charge. Cette fois on a mis les pôles auxiliaires en série avec le circuit principal, de façon qu'ils soient parcourus par le courant total de la machine ; chaque pôle est muni de 90 spires. Pour la pleine charge normale de 25 A, on a donc

$$90 \times 25 = 2\,250 \text{ ampères-tours.}$$

La réaction de l'induit par champ simple est de 1 800 A-t, donc le rapport est de $\frac{2\,250}{1\,800} = 1,25$, soit 25 pour 100 pour compenser les forces électromotrices de fuites.

La résistance du bobinage prévu sur les deux pôles est de 0,051 ohm.

La figure 42 donne trois oscillogrammes (clichés 304, 306 et 305). Les conditions sont les suivantes : la différence de potentiel aux bornes de la génératrice à vide est 120 v, la vitesse 1 100 t : mn ; les courants sont respectivement égaux à 20, 25 et 30 A.

Les courbes peuvent être comparées à celles de la figure 24 sans pôles auxiliaires et examinées dans le chapitre précédent (§ 20). En laissant de côté, pour le moment, la partie interpolaire, les courbes sont tout à fait semblables. La distorsion est du même ordre de grandeur ; nous avons remarqué à l'alinéa 48 que les pôles de commutation ne changent en rien la distorsion, fait qu'on constate ainsi expérimentalement. Dans l'intervalle interpolaire, il aurait fallu, pour des pôles auxiliaires bien calculés, une différence de potentiel nulle aux bornes de la bobine, c'est-à-dire une courbe confondue avec l'axe de zéro. Mais, si on regarde cette portion de courbe, comprise dans l'intervalle interpolaire, on observe que la force électromotrice dans la bobine n'est pas complètement compensée ; de plus, il y a des points qui nous rappellent la forme trouvée dans le cas où les pôles auxiliaires n'existaient pas. Les pointes dues à la commutation s'accroissent au fur et à mesure que le courant s'accroît dans l'armature de la dynamo. Le fait que, dans cette zone, la courbe passe d'un côté à l'autre de l'axe de zéro est dû à la présence de la chute ohmique rI dans la section en question comme il a déjà été expliqué plus haut au paragraphe 18. Mais la sensibilité de l'oscillographe n'est pas suffisante pour qu'on puisse se rendre compte exactement si, une fois le nouvel axe de zéro tracé, il reste seulement ces pointes ou bien une dyssymétrie quelconque. Un fait est certain, c'est que les pointes subsistent, donc les pôles auxiliaires n'ont pas un nombre d'ampères-tours suffisant pour contrebalancer les forces électromotrices prenant naissance dans la section du fait de la commutation.

52. Pour mieux nous en rendre compte, nous avons utilisé le petit frotteur qui donne la tension entre le balai et la lame en train de quitter ce balai (voir § 43).

Nous avons relevé deux oscillogrammes pour le fonctionnement en génératrice sous 120 v, 1 100 t : mn avec les balais LFC₃BS, les courants de l'induit étant de 20 et 30 A (clichés 302 et 303, fig. 43) correspondant aux valeurs des clichés 304 et 305. La sensibilité des oscillogrammes de la figure 43 est la même, 23 mv par millimètre sur l'épreuve originale. La première indique une valeur de 0,092 v pour la moyenne des pointes, la deuxième 0,161 v. On voit très bien sur ces deux courbes, prises l'une à $\frac{4}{5}$ de la charge et l'autre à $\frac{6}{5}$, que

les pôles auxiliaires tels qu'ils sont réglés sont insuffisants dans les deux cas.

Bien entendu, il existe une grosse différence entre

cette valeur qu'on mesure dans le cas des pôles auxiliaires et celle que l'on a trouvée quand ils n'existaient pas. Dans des conditions exactement les mêmes et avec

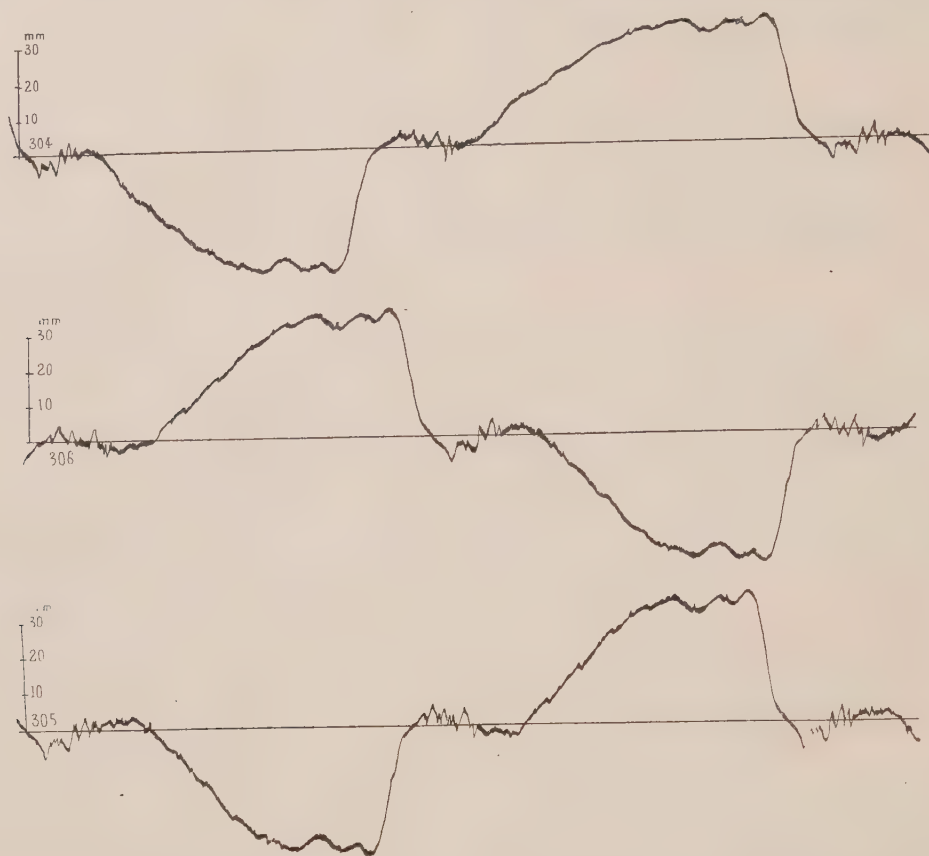


Fig. 42. -- Oscillogrammes de la tension de section de la dynamo spéciale H-100^{1/2} avec pôles auxiliaires en génératrice, $n = 1\ 100\ t : mn$, $E_0 = 120\ V$; a (cliché 304), $I = 20\ A$; b (cliché 306), $I = 25\ A$; c (cliché 305), $I = 30\ A$.

les mêmes balais, sans pôles auxiliaires, nous avons mesuré une tension de l'ordre de 2 v.

53. Nous avons essayé de comparer le fonctionnement des deux balais déjà utilisés précédemment dans les mêmes circonstances, autant que possible.

Pour étudier ces différentes propriétés, nous avons alimenté par une source indépendante les pôles auxiliaires. De cette façon, on pouvait très facilement régler jusqu'à suppression des étincelles aux balais.

On a commencé par étudier chaque balai, séparé-

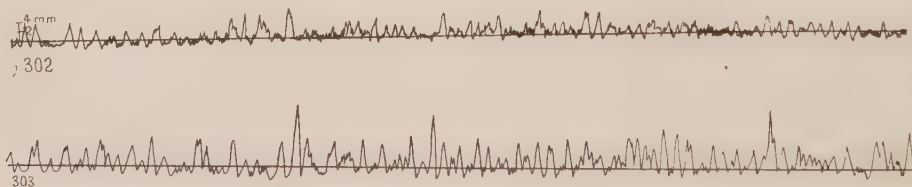


Fig. 43. — Oscillogrammes de la tension entre le balai positif et le petit frotteur de la dynamo spéciale H-100^{1/2} avec pôles auxiliaires en génératrice et balais LFC₃BS, $n = 1\ 100\ t : mn$, $E_0 = 120\ V$; a (cliché 302), $I = 20\ A$; b (cliché 303), $I = 30\ A$.

ment, après rodage très soigné, sous différentes vitesses de l'armature.

Les résultats sont inscrits dans la figure 44. Les conditions dans lesquelles on les a tracés sont les sui-

vantes : la dynamo fonctionnait en génératrice sous une tension aux bornes constante de 20 v et un courant constant de 30 A, soit 20 pour 100 de surcharge. Un rhéostat, intercalé en série avec les pôles auxiliaires,

permettait de régler le courant qui les traversait jusqu'à suppression des étincelles au collecteur.

Ces courbes sont pratiquement des droites dans l'intervalle où elles ont été relevées. Pourtant, il faut remarquer que, d'une façon systématique, le courant nécessaire dans les pôles auxiliaires est plus grand pour les balais EG, que pour les balais LFC.

54. Dans une autre série d'essais, nous avons cher-

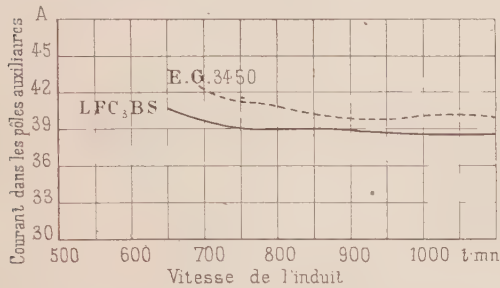


Fig. 44. — Variation du courant dans les pôles auxiliaires en fonction du nombre de tours de la génératrice pour une tension constante $E_0 = 20$ v (à vide) et un courant $I = 30$ A.

ché la variation du courant nécessaire dans les pôles auxiliaires quand on fait varier la tension aux bornes de la dynamo et, par conséquent, l'excitation, les autres variables, vitesse et courant, étant gardées les mêmes ; courbe de la figure 45. La vitesse était de 1100 t/mn et le courant principal, 30 A.

Ces courbes vérifient le fait que nous avons déjà

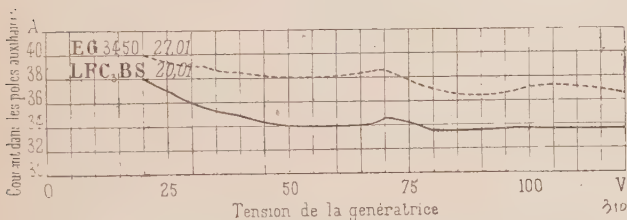


Fig. 45. — Variation du courant dans les pôles auxiliaires en fonction de la tension de la génératrice à vide, pour le même courant débité $I = 30$ A et $n = 1100$ t/mn.

constaté, savoir que la commutation varie très peu quand on change l'excitation, mais on observe tout de même une légère différence entre la marche à pleine excitation et la marche avec le système inducteur désaimanté. Dans ce dernier cas, pour supprimer les étincelles au collecteur, il faut un courant un peu plus fort que dans le premier. En outre, on observe, comme auparavant, que les balais EG nécessitent un courant plus fort dans les pôles auxiliaires que les balais LFC, dans des conditions rigoureusement identiques.

C. Réglage des pôles auxiliaires. — 55. Les pôles auxiliaires, calculés avec le plus grand soin, doivent être vérifiés pour se convaincre qu'ils correspondent vraiment à la mission qu'on leur a confiée. Dès l'intro-

duction de ce chapitre, nous avons attiré l'attention sur le fait que les formules employées ne donnent que des valeurs approchées pour le nombre d'ampères-tours nécessaires sur ces pôles. La machine une fois construite, on ne peut songer à augmenter le nombre de spires parce que, dans la plupart des cas, il ne reste pas de place disponible. Au contraire, on peut facilement diminuer le nombre d'ampères-tours en shuntant plusieurs spires. D'autre part, le courant est imposé ; quand le nombre de spires est trop grand, on agit souvent, pour régler le fonctionnement des pôles auxiliaires, sur la longueur de l'entrefer, ou en créant un entrefer artificiel entre le noyau et la culasse par l'introduction de tôles en laiton ou toute autre matière non magnétique. Si les ampères-tours ne sont pas suffisants, on peut diminuer l'entrefer en introduisant des tôles magnétiques entre le noyau et la culasse. Dans les machines modernes, on prévoit toujours des tôles de réglage, parce qu'on ne peut guère compter sur le calcul exact des pôles de commutation.

Un autre problème qui se pose, c'est de vérifier le réglage des pôles auxiliaires. Il existe différents procédés : les uns reposent sur la mesure de la tension entre deux lames à l'entrée et à la sortie du balai ; d'autres s'appuient sur le relevé de la tension de section dans la zone de commutation ; d'autres, enfin, sur la mesure de la tension entre le balai et la lame qui le quitte.

Théoriquement, l'égalité de potentiel des lames à l'entrée et à la sortie du balai correspond à la commutation linéaire et, même dans ce cas, il subsiste entre le balai et la lame qui va le quitter une différence de potentiel égale à la chute de tension due au contact sous la densité moyenne.

La commutation linéaire étant purement idéale, l'étude de la tension entre balai et lame avant permet d'effectuer un bon réglage des pôles auxiliaires en assurant pour cette tension une valeur aussi constante que possible en même temps que très faible ; remarquons toutefois qu'une valeur nulle de cette tension correspond théoriquement à une légère surcommutation, qui ne présente aucun inconvénient, mais plutôt un avantage en vue de surcharges éventuelles.

D'autre part, nous avons vu que, dans la partie finale d'une commutation imparfaite, une énergie reste à dissiper par la production d'une étincelle. Mais, pour que celle-ci se réalise, il est nécessaire d'avoir une différence de potentiel minimum au-dessous de laquelle l'étincelle ne peut s'amorcer en aucun cas. Pour évaluer l'énergie mise en jeu, il faut connaître le courant de renversement dans la section et on ne peut y arriver qu'en travaillant sur une section artificielle avec un oscillographe en série. L'autre élément, la tension, est plus facile à relever, soit avec un oscillographe, soit même plus simplement avec un voltmètre très sensible. En faisant varier le nombre d'ampères-tours du pôle auxiliaire, on cherche à rendre la tension indiquée aussi petite que possible. De cette manière, on arrive en même temps à réaliser une forme très convenable du champ dans la zone interpolaire.

56. Pour régler les pôles auxiliaires de la dynamo H-100/2 spéciale, nous avons employé ce système ; nous les avons alimentés séparément, de façon à faire varier le nombre des ampères-tours par réglage du courant.

La machine fonctionnant en génératrice, à la vitesse

de 1 100 t : mn, sous une tension de 120 v à vide, on lui a fait débiter un courant de 30 A, soit 20 pour 100 de surcharge. Dans les pôles auxiliaires, on a fait passer d'abord 30 A, et on a relevé l'oscillogramme 309 de la figure 46. La courbe supérieure représente la tension de section de la dynamo ; la deuxième, la différence de

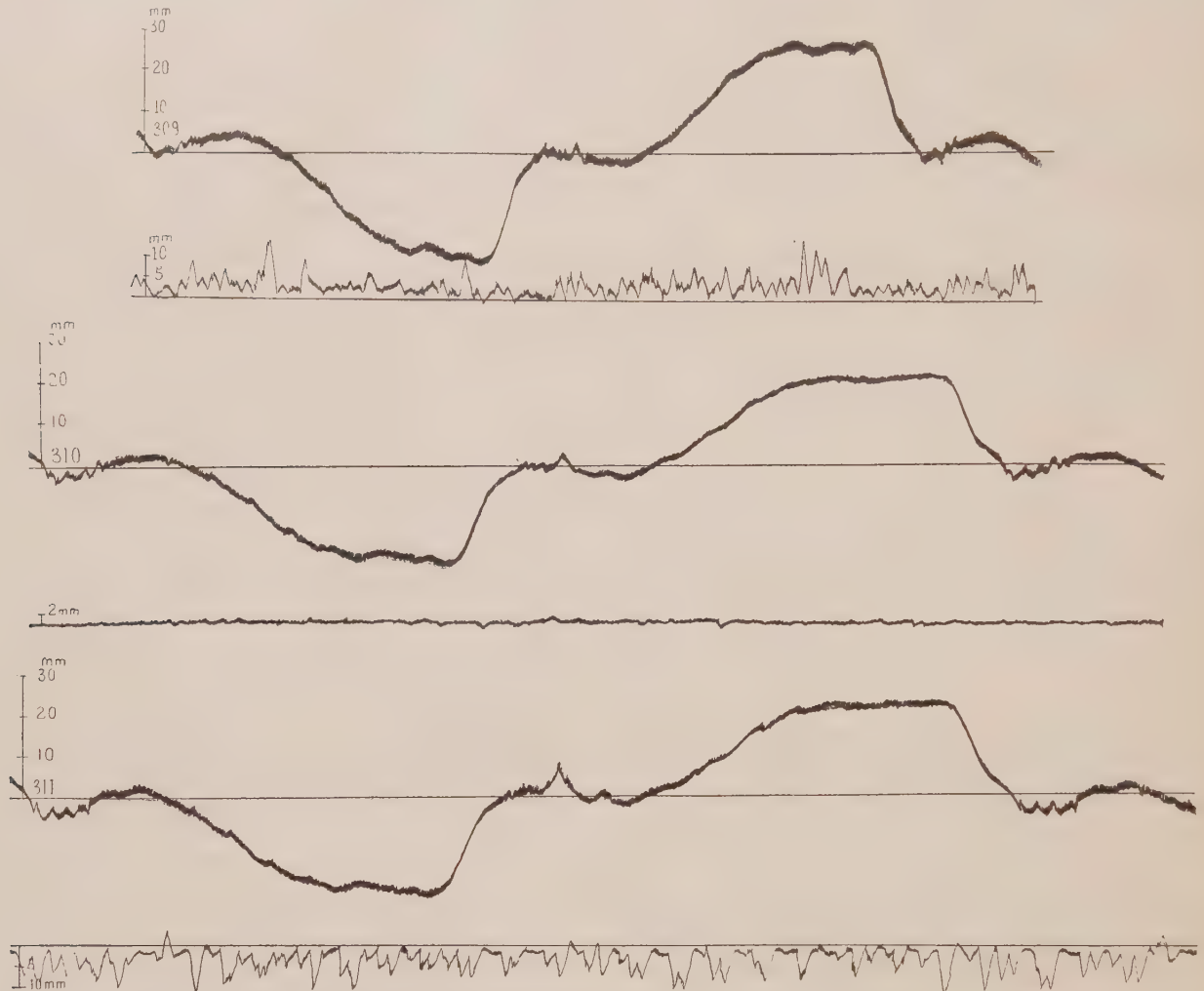


Fig. 46. — Oscillogrammes de la dynamo spéciale H-100/2 avec pôles auxiliaires en génératrice. La courbe supérieure représente la tension de section. La courbe inférieure représente la tension entre le balai (+) et le petit frotteur. $n = 1\,100$ t : mn, $E_0 = 120$ v. a (cliché 309), courant de l'induit, $I = 30$ A ; courant des pôles auxiliaires, $I_{pa} = 30$ A ; b (cliché 310), $I = 30$ A et $I_{pa} = 33,5$ A ; c (cliché 311), $I = 30$ A et $I_{pa} = 35$ A.

potentiel entre le balai positif et le petit frotteur ; les balais employés sont les balais LF C₃ BS.

En examinant la première courbe dans la zone interpolaire, on observe une partie en dessous et l'autre en dessus de l'axe de zéro. La deuxième partie est beaucoup plus étendue que la première et son amplitude est aussi plus forte. Quant à la couche inférieure, d'après la sensibilité de l'équipage, elle représente une différence de potentiel de 72 mv, pour la valeur moyenne des pointes. Les deux courbes montrent bien que les pôles ne sont pas tout à fait suffisants comme nombre d'ampères-tours.

Nous avons donc renforcé le courant dans les pôles auxiliaires jusqu'à 33,5 A, dans les mêmes conditions de courant principal, 30 A. On a relevé le cliché 310 de la figure 46. Sur la courbe supérieure, on observe sur la zone interpolaire que les parties de la courbe des deux côtés du zéro sont plus égales comme étendue et comme amplitude ; la répartition est meilleure pour le balai positif. Pour le balai négatif la forme indique que la valeur des ampères-tours est un peu trop forte ; on voit même l'apparition d'une petite pointe de commutation. Pour le balai positif, on peut considérer que la valeur moyenne de la force électromotrice de la section dans

la zone neutre est nulle ; dans tous les cas, on n'observe aucune pointe d'importance appréciable.

Quant à la deuxième courbe, son ordonnée est, dans ce cas, négligeable, puisqu'elle n'atteint même pas 1 mm, soit 10,8 mv, d'après la constante du bifilaire.

On a augmenté encore le courant dans les pôles auxiliaires à la valeur de 35 A, les autres conditions étant les mêmes. Dans ce cas on a relevé le cliché 311 de la figure 46.

La tension de section pour le balai positif montre que la première partie de la courbe dans la zone interpoilaire accuse une valeur plus forte et en même temps une étendue assez grande, qui dépasse celle de la deuxième partie, contrairement à ce qui se passait dans le cliché 309. De plus, on constate de petites pointes de commutation, sans qu'elles atteignent des valeurs importantes. Pour le balai négatif, la différence est bien nette ; une pointe assez prononcée indique que, pour ce balai, les pôles sont beaucoup trop forts. Dans cette région, la forme tend à se rapprocher de celle qu'on trouve dans la dynamo sans pôles de commutation.

D'autre part, dans la deuxième courbe (du frotteur), on remarque que les déviations sont de l'autre côté de

la ligne de zéro et, en valeur absolue, la moyenne des pointes atteint 86 mv ; par conséquent, le sens de la différence de potentiel a été renversé entre le balai et le frotteur, par rapport au cliché 309 et on déduit immédiatement que maintenant les pôles sont trop forts.

De l'examen de ces trois clichés, on déduit très nettement le moment où le réglage est bien fait et on peut fixer d'une manière précise la valeur à donner aux ampères-tours des pôles auxiliaires.

D. Différents fonctionnements de la machine.

— 57. En suivant les mêmes recherches que dans le chapitre précédent, on est amené à étudier le fonctionnement de la même machine en génératrice, moteur et commutatrice, avec les deux sortes de balais et avec des pôles auxiliaires, le but étant de chercher dans chaque cas le nombre d'ampères-tours nécessaires pour une bonne commutation.

Les pôles auxiliaires ont été excités indépendamment et le réglage était fait jusqu'au moment où on arrivait à une courbe analogue à celle du cliché 310 (fig. 46).

Les observations que nous avons faites sont inscrites dans le tableau G.

TABEAU G

BALAI EG3450								
COURANT I DANS L'INDUIT ampères	GÉNÉRATRICE		MOTEUR		COMMUTATRICE			
					ALT.-CONT.		CONT.-ALT.	
	I_{pa}	DIFFÉRENCE EN MOINS centièmes	I_{pa}	DIFFÉRENCE EN MOINS centièmes	I_{pa}	DIFFÉRENCE EN PLUS centièmes	I_{pa}	DIFFÉRENCE EN PLUS centièmes
10	15,5	35,5	13,5	26	5	50	4,5	55
15	21	28,5	18	16,5	6,5	57	7,5	50
20	26	23	24	16,5	9	55	10	50
25	32	22	28,5	12,5	11,5	54	12,5	50
30	36,5	18	34	11,5	14	53,5	15,5	48,5
Premières étincelles sans pôles auxi- liaires pour le balai +	2,2		2,8		4		3,5	

BALAI LFC ₃ BS								
10	11	16,5	10,5	4,75	3,5	65	4,5	55
15	9,1	9,1	16	6,2	5,5	63	7	53
20	22	10	21,5	7	8	60	8	57,5
25	28	10,7	27	7,4	10	60	10	60
30	33,5	11,6	32,5	7,7	11,5	62	12	60
Premières étincelles sans pôles auxi- liaires pour le balai +	6,3		8		11,5		9	

Les conditions étaient les mêmes pour la marche en génératrice et moteur : 1100 t : mn et 120 v à vide ; pour la commutatrice directe (courant alternatif en

courant continu), la vitesse était 1350 t : mn et la tension du côté à courant continu 120 v ; la commutatrice inversée (de courant continu en courant alternatif)

fonctionnait comme la génératrice, avec une tension d'alimentation du côté à courant continu de 120 V ; du côté alternatif la machine débitait sur résistance pure.

Dans ce tableau, on a inscrit dans une première colonne le courant dans l'induit ; ensuite, pour chaque cas, le courant d'alimentation des pôles auxiliaires pour la meilleure commutation et, enfin, la différence évaluée en centièmes entre les deux valeurs précédentes.

Ce tableau montre la différence entre les propriétés des deux qualités de charbon et des divers modes de fonctionnement.

En l'analysant de plus près, on peut remarquer :

a) Pour les deux balais, dans le cas de la génératrice, le nombre d'ampères-tours logés sur les pôles auxiliaires est insuffisant. La différence en moins est en moyenne de 10 pour 100 pour les balais LFC et de 25 à 30 pour 100 pour les balais EG.

b) Dans le fonctionnement en moteur, on trouve une différence toujours en moins, mais plus faible que dans le cas précédent. Elle peut être évaluée pour les balais LFC à 6 pour 100 ; pour les autres, à 15 pour 100.

c) Pour la marche en commutatrice directe, convertissant du courant alternatif en courant continu, on sait que le nombre d'ampères-tours est généralement beaucoup plus faible qu'en génératrice. En fait, on trouve que les ampères-tours installés sont beaucoup trop forts ; la différence en plus est d'environ 60 pour 100 pour les balais LFC et 55 pour 100 pour les balais EG.

d) La dynamo fonctionnant toujours en commutatrice, mais en sens inverse, c'est-à-dire convertissant du courant continu en courant alternatif sur rhéostat métallique, on trouve que les ampères-tours sont trop forts d'environ 55 pour 100 pour les balais LFC et de 50 pour 100 pour les balais EG.

De ces observations, on peut conclure :

1° L'emploi des balais EG 3450 nécessite un nombre plus fort d'ampères-tours sur les pôles auxiliaires que celui des balais LFC₃BS dans les mêmes conditions de fonctionnement et pour la même qualité de commutation.

2° La marche en moteur demande un nombre d'ampères-tours légèrement inférieur à celui exigé pour la marche en génératrice ; on peut évaluer la différence à une valeur moyenne de 5 pour 100, ce qui se trouve en contradiction avec l'affirmation de Dodd⁽²⁸⁾, qui estime qu'il n'existe aucune différence.

3° Le fonctionnement en commutatrice directe ou inverse donne à peu près les mêmes résultats ; pourtant on peut considérer une légère différence en moins pour la commutatrice directe.

4° Pour les différentes valeurs de la charge de la machine, le rapport du courant dans l'induit au nombre des ampères-tours nécessaires sur les pôles auxiliaires ne se maintient pas rigoureusement constant : il s'accroît en même temps que la charge, mais assez légèrement, pour les balais LFC, tandis qu'il diminue pour les balais EG.

Il est à remarquer que la simple observation de l'apparition des étincelles, pour des valeurs données du courant dans l'induit et dans les pôles auxiliaires, n'est pas suffisante pour permettre un réglage précis ; on peut, en effet, croire que, à un moment donné, le réglage est bon, alors qu'en réalité l'oscillographe montre qu'il n'en est pas ainsi.

Les étincelles qui apparaissent, assez tard d'ailleurs, dans le fonctionnement en surcharge avec pôles auxiliaires en série dans l'induit, ont un caractère différent de celles que nous avons dénommées « premières étincelles » dans l'étude sans pôles auxiliaires. Dans le cas où il y a des pôles auxiliaires, les étincelles sont beaucoup plus nourries et, dès le début, sont assez fortes. Comme caractère général, elles se rapprochent de celles que nous avons nommées nettement visibles, sans présenter cependant la caractéristique d'un vrai crachement ; ces étincelles sont assez dangereuses, parce qu'elles piquent très vite les charbons, fait qu'on observe seulement pour le crachement.

E. Calcul des pôles auxiliaires. — 58. Au commencement de ce chapitre, nous avons dit que le calcul des pôles auxiliaires ne peut être qu'approximatif et que le réglage seul, après construction, fixe définitivement le nombre d'ampères-tours nécessaire. Nous avons donné la raison de l'impossibilité dans laquelle on se trouve, pour le moment au moins, de faire des calculs exacts dans cette direction. La complexité des phénomènes s'y oppose. De plus, on n'est pas encore bien fixé, d'après ce que nous avons montré dans le chapitre II, sur le calcul des ampères-tours agissant dans la zone de commutation et qui précisément doivent être contrebalancés par les ampères-tours des pôles auxiliaires.

Théoriquement, pour faire le calcul, il faut procéder de la manière suivante :

D'abord, si on considère les ampères-tours totaux J_a de l'induit, les pôles auxiliaires doivent les contrebalancer. Dans l'hypothèse que ces ampères-tours J_a sont annihilés, la section devrait tourner dans un champ nul et n'être soumise à aucune force électromotrice. Mais, en réalité, il n'en est rien parce qu'il existe, en outre, des têtes de bobines traversées par un flux variable et, par suite, soumises à une force électromotrice d'induction. D'autre part, il y a, en plus, différents autres flux de fuites, par exemple, d'une dent à l'autre, qui n'intéressent pas le circuit principal. Pour annuler les forces électromotrices dues à ces fuites, il faut prévoir sur les pôles auxiliaires un nombre supplémentaire d'ampères-tours J_w qui servira à faire circuler, dans le circuit magnétique des pôles auxiliaires, un flux convenable pour engendrer par rotation de la section dans ce flux une force électromotrice détruisant les forces électromotrices dues aux fuites. Remarquons que ces ampères-tours doivent assurer aussi le passage dans le pôle du flux de fuite propre de ce pôle produit par l'ensemble des ampères-tours qu'il comporte et que la valeur généralement calculée pour J_w est trop petite parce

qu'on ne tient pas compte de la réluctance, de la partie fer du circuit, qui souvent n'est pas négligeable à cause de la saturation en divers points.

De plus, nous avons admis que les ampères-tours de l'induit à compenser par le pôle auxiliaire avaient la valeur J_a ; or, nous avons trouvé par l'étude au balistique de l'induit (chap. II) que, dans le milieu de la zone de commutation, le champ de l'induit présentait un renforcement notable. Il nous a paru possible que ce renforcement était dû, en partie, à une diminution de réluctance du circuit en ce point et, en partie, à une majoration d'ampères-tours de la dent centrale due à la nature particulière du bobinage en tambour.

L'augmentation du champ due à la différence de réluctance n'intervient plus en présence des pôles auxiliaires, mais la majoration d'ampères-tours subsiste et, à notre avis, est susceptible d'exiger sur les pôles auxiliaires un second supplément d'ampères-tours J'_a , qui peut avoir une certaine importance.

Si on examine les valeurs numériques du champ au point A (fig. 17) et si on prend la moyenne des champs aux points a et b, d'après la forme relevée, on trouve une augmentation de 40 pour 100 pour la valeur du champ dans la zone de commutation. En admettant que la majoration due au bobinage tambour soit de 20 pour 100 et que les ampères-tours des pôles de commutation soient de 35 pour 100 en plus de ceux de l'induit, comme nous l'avons vu, il en résulterait une augmentation de 15 pour 100 pour les fuites, valeur assez convenable avec une machine de cet ordre de grandeur.

Par conséquent, les pôles auxiliaires doivent être munis en tout d'un nombre d'ampères-tours égal à

$$J_{pa} = J_a + J'_a + J_w.$$

Dans la figure 47, nous avons reproduit schématiquement

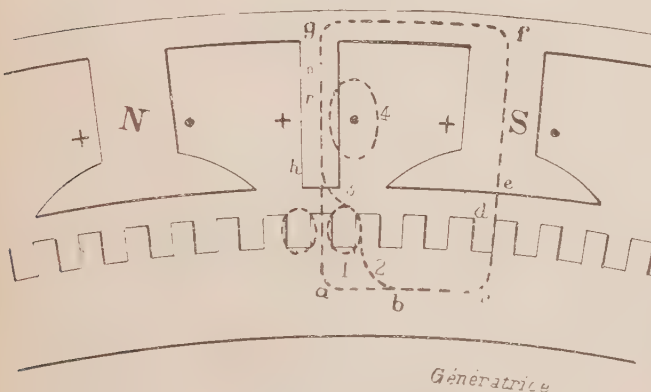


Fig. 47. — Circuit magnétique des pôles auxiliaires dans une génératrice.

quement la disposition d'un champ double d'une génératrice à courant continu pourvue de pôles de commutation. Nous avons indiqué la ligne de force moyenne du flux auxiliaire, ainsi que les fuites qui se produisent généralement.

Les ampères-tours de fuites sont assez difficiles à évaluer. Dans leur calcul, il faut faire intervenir surtout l'expérience, mais malheureusement on ne dispose pas d'une documentation systématiquement ordonnée, dont on pourrait tirer les indications nécessaires. Il est certain que la forme de la plaquette des pôles auxiliaires a une grosse influence, surtout dans la disposition des lignes de fuites 3 entre un pôle de commutation et le pôle principal de sens contraire. Aussi le rapport entre le plein et le creux de l'induit doit intervenir pour régler la direction de lignes de forces telles que 2, c'est-à-dire de lignes qui rejoignent une autre dent que celle en commutation. Les lignes de forces telles que le numéro 4 n'entrent en jeu qu'au moment de la saturation, en se fermant autour des bobines inductrices des pôles. Le degré d'ouverture de l'encoche influe aussi d'une manière assez sensible sur les flux de fuites entre les parois en regard d'une même entaille.

M. Mauduit, dans son cours, indique la formule qui donne le nombre J_w d'ampères-tours à loger sur les pôles de commutation

$$J_w = \alpha \omega \left(1 + \frac{1,6 \gamma_e \lambda_s \delta'}{L} \right),$$

où α , ω , γ_e , λ_s et L ont les mêmes significations qu'au paragraphe 45; δ' est l'entrefer des pôles auxiliaires.

Si on applique cette formule pour la dynamo spéciale, avec $\delta' = 0,3$ cm, on a

$$J_w = 144 \times 25 \left(1 + \frac{1,6 \times 0,615 \times 1,08 \times 0,3}{15,5} \right)$$

$$= 1,0206 \times 144 \times 25 = 3\,680 \text{ A} \cdot \text{t.}$$

par champ double.

Cette formule donne des valeurs reconnues trop faibles et l'auteur indique que, généralement, on majore de 25 pour 100 le nombre d'ampères-tours de l'induit, de façon qu'on ait

$$J_w = 1,25 J_a$$

où $J_a = \alpha \omega$ (ampères-tours de l'induit).

La Compagnie générale électrique de Nancy a employé cette formule pour la construction de la dynamo que nous étudions; mais nous avons vu, en examinant le tableau G, que les ampères-tours ainsi calculés ne suffisent pas pour rendre la commutation assez bonne.

Il n'est pas sans intérêt, peut-être, de faire remarquer que, dans le cas de cette machine, les fuites dans l'encoche doivent être assez notables, à cause de la forme particulière donnée à leur partie supérieure (voir la figure 8).

Wilhelm Oelschlager ⁽²⁹⁾ tout dernièrement, en 1920, a publié une méthode pour déterminer l'induction nécessaire dans l'entrefer du pôle auxiliaire.

La formule employée est la suivante

$$\mathcal{B}_{wl} l_{wi} = A_s [\zeta]$$

avec

$$[\zeta] = \{ c_k [2(\lambda_n + \lambda_z) l_i + \lambda_s \lambda_s] + [\lambda_{qa} (l_i - l_{wi}) + \lambda_{qs} l_s] \}$$

et

$$\lambda_n = 0,4\pi \left(\frac{5}{12} \frac{h_1}{b_n} + \frac{h_2}{b_n} \right) + \frac{c_n}{2}$$

$$\lambda_{zw} = \frac{b_z + 2\delta_w}{2\delta_w} \cdot \frac{l_{wi}}{l_i}, \quad \lambda_s = 0,44 \left(\log \frac{l_s}{m+n} + \frac{l_s}{t'_p} - 1,4 \right),$$

$$\lambda_{qa} = \frac{1,8}{1 - \frac{t_p}{l_p}}, \quad \lambda_{qs} = \frac{1,8}{\sin \alpha} \cdot \frac{l_x}{l_s}, \quad c_k = \frac{K_n}{K_n + K_b - \frac{a}{g}},$$

les notations sont les suivantes (voir aussi la figure 48) :

$C_k = 4$, pour un induit avec les entailles demi-ouvertes ;

δ_w , entrefer de pôle auxiliaire ;

l_i , longueur du fer de l'induit ;

l_{wi} , longueur du pôle auxiliaire dans le sens axial ;

l_s , longueur d'une tête de bobine ;

t'_p , pas polaire au milieu de l'entaille ;

P , épanouissement polaire ;

t_p , pas polaire ;

α , angle de la tête de bobine ;

l_x , longueur axiale du fer sur laquelle reposent les têtes de bobines ;

A_s nombre d'ampères-conducteurs par centimètre de périphérie de l'induit.

En introduisant les valeurs de la dynamo spéciale,

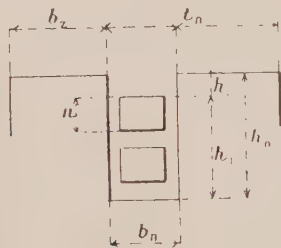


Fig. 48.

on trouve pour $\mathcal{B}_{wl}$, induction dans l'entrefer du pôle auxiliaire,

$$\mathcal{B}_{wl} = 2\,550 \text{ gauss.}$$

Le nombre d'ampères-tours nécessaires sur le pôle, avec un entrefer simple de 0,3 cm et en prenant $\frac{4}{3}$ pour tenir compte du reste du circuit magnétique, est

$$ni = \frac{4}{3} \times 0,8 \times 2.550 \times 0,3 = 812 \text{ A} \cdot \text{t},$$

alors que l'enroulement des pôles auxiliaires présente

2 550 A-t, nombre insuffisant pour assurer une bonne commutation, comme nous l'avons constaté.

Par conséquent, le calcul des pôles auxiliaires est assez difficile et on ne peut pas encore dire qu'on soit en possession d'une formule convenable pour chercher le nombre d'ampères-tours nécessaires avec une bonne précision. Un calcul exact devrait tenir compte, en outre, des conditions énumérées plus haut, de la qualité des balais employés, qui a son importance.

Des études que nous avons faites sur la dynamo H — 100/2 et avec les balais indiqués, on peut déduire que le nombre d'ampères-tours nécessaires sur de telles machines électriques, munies de balais analogues, peut être pris d'après le tableau H.

TAALEAU H

QUALITÉS DES BALAIS	GÉNÉRATRICE $\frac{\mathcal{I}_{pa}}{\mathcal{I}_a}$	MOTEUR $\frac{\mathcal{I}_{pa}}{\mathcal{I}_a}$	COMMUTATRICE	
			DIRECTE $\frac{\mathcal{I}_{pa}}{\mathcal{I}_a}$	INVERSE $\frac{\mathcal{I}_{pa}}{\mathcal{I}_a}$
EG3450.....	1,55	1,45	0,58	0,62
LFC ₃ BS.....	1,35-1,75	1,3-1,35	0,5	0,55

Il faut attirer l'attention sur le fait que l'entrefer des pôles auxiliaires est égal à celui des pôles principaux.

Dans ce tableau, les coefficients respectifs doivent être multipliés par le nombre d'ampères-tours $\mathcal{I}_a$ de l'induit pour fournir les ampères-tours $\mathcal{I}_{pa}$ à loger sur les pôles auxiliaires.

F. Conclusion. — 59. De l'exposé que nous avons fait, on peut déduire les conclusions suivantes :

a) En ce qui concerne l'étude des champs magnétiques de la dynamo, nous avons développé les conclusions au paragraphe 23 du chapitre II.

Rappelons-les en résumé :

a) Pour la dynamo à enroulement en tambour, série ou parallèle, la valeur du champ de l'induit présente dans la zone de commutation un renforcement, dont il faut tenir compte. Ce renforcement est dû en partie à une diminution de la réluctance dans cette zone et, en partie, à une disposition spéciale de l'enroulement autour de la dent en commutation, correspondant à une majoration notable d'ampères-tours dans cette région.

b) L'étude des champs statiques d'une dynamo concorde assez bien avec l'étude des champs dynamiques.

β) Pour l'étude de la commutation, sans et avec pôles auxiliaires, dont nous nous sommes occupé dans les chapitres III et IV, on peut conclure :

a) Les balais tendres du type LFC commutent plus facilement que les balais semi-durs du type EG.

b) Pour l'apparition d'étincelles de même importance, la quantité d'énergie absorbée par centimètre

d'arête pour le balai LFC est plus grande que la quantité correspondante pour le balai EG.

La dureté d'un balai ne peut donc pas servir comme base d'indication sur la manière dont il se comportera au point de vue de la commutation.

c) Pour le critérium d'une bonne commutation, si on emploie la formule recommandée par M. Mauduit pour le calcul de la tension caractéristique, il semble préférable d'adopter des limites de tension plus faibles que la valeur de 1 v proposée par M. Mauduit.

Ces limites varient, d'ailleurs, pour la génératrice et le moteur et suivant la qualité des balais.

d) Le calcul des pôles auxiliaires, d'après les formules couramment employées, ne conduit pas à un parfait fonctionnement d'une machine à courant continu.

Le nombre d'ampères-tours calculé est généralement trop faible ; on connaît mal la valeur des fuites ;

on ne tient pas compte de la saturation du circuit et on laisse de côté une majoration d'ampères-tours mis en jeu dans l'induit par les dispositions particulières de l'enroulement tambour.

e) Chaque balai se comportant d'une façon spéciale dans la commutation, il faudrait tenir compte de la qualité employée, pour le calcul des pôles auxiliaires.

f) Pour régler les pôles auxiliaires, on dispose d'un moyen simple et précis dans le relevé (à l'oscillographe ou à défaut au voltmètre) de la tension entre le balai et un petit frotteur placé à la sortie de ce balai.

César PARTENI ANTONI,
Ingénieur électricien de l'Institut électrotechnique
de Jassy, assistant à la Faculté des Sciences
de Jassy (Roumanie).

Nancy, le 31 janvier 1925.

Index bibliographique

- (¹) A. MAUDUIT. *Contribution expérimentale et théorique à l'étude de la commutation dans les dynamos à courant continu*. Thèse présentée à la Faculté des Sciences de Nancy, Dunod et Pinat, à Paris, 1912.
- Voir aussi A. MAUDUIT. *Machines électriques (théorie, essais et construction)*, 3^e édition, 1922, Dunod, Paris.
- (²) L'article a paru sous la signature W. A. P. dans l'*Electrical Review*, 1900, t. XLVI, p. 43.
- (³) E. ARNOLD. *La machine dynamo à courant continu*. Traduction française par E. Boistel et E.-T. Brunswick. Librairie Béranger, Paris, 1904.
- (⁴) Karl PICHELMAYER; Zur theorie der Stromwendung. *Elektrotechnische Zeitschrift*, 7 janvier, 24 et 31 octobre 1912, t. XXXIII, p. 1, 1100 et 1129.
- (⁵) NIETHAMMER; Über Kommutierung. *Elektrotechnik und Maschinenbau*, 11 février 1912, t. XXX, p. 113.
- (⁶) B.-G. LAMME; A theory of commutation and its application to interpole machines. *Proceedings of the american Institute of electrical Engineers*, 13 octobre 1911, t. XXX, p. 2049. Discussion à New-York, 13 octobre 1911, p. 2550.
- Physical Limitation in direct current commutating machinery. *Proceedings of the american Institute of electrical Engineers*, septembre 1915, t. XXXIV, p. 1559.
- (⁷) Wilhelm OELSCHLAGER; Zur Berechnung der Wandlerpole bei Gleichstrommaschine. *Elektrotechnik und Maschinenbau*, 6 juin 1920, t. XXXVIII, p. 261.
- (⁸) Marius LATOUR; La commutation dans les machines à courant continu et à courants alternatifs. *Bulletin de l'Association des Ingénieurs électriciens sortis de l'Institut électrotechnique de Montefiore*, août, septembre et octobre 1912.
- (⁹) Voir l'ouvrage cité en note 3, p. 275 et aussi E. ARNOLD. *Die Gleichstrommaschine*, 1919 (nouvelle édition), p. 170.
- Charles R. MOORE; Air Gap flux distribution in direct current machines. *Proceedings of the american Institute of electrical Engineers*, 16 avril 1912, t. XXXI, p. 197.
- (¹⁰) R. RÜDENBERG. *Theorie der Kommutation in Gleichstrom — Dynamomaschinen*, 1907, Verlag von Ferdinand Enke, Stuttgart.
- (¹¹) G.-G. LEWIS; Effect of brush width on commutation. *The electric Journal*, 1916, t. XIII, p. 376.
- (¹²) REZELMAN; Recherche sur les phénomènes de la commutation. Extrait du *Bulletin mensuel de la Société belge d'Electriciens*, décembre 1913, janvier et février 1914. On trouve, à la page 155, dans la note (¹): « Les raccords extérieurs sont presque négligeables; nous avons introduit une valeur environ moitié de celle que l'on admet généralement ».
- (¹³) L'école entière d'ARNOLD donne cette représentation (voir les notes 3, 5, 9 et 10), ainsi que :
LAMME (voir la note 6);
Oskar SZILAS; Experimentelle Erfahrungen über Gleichstrommaschine mit Wendepolen. *Elektrotechnik und Maschinenbau*, 9 novembre 1913, t. XXXI, p. 949.
Ludwig BINDER; Stromwendung und Wendepole. *Elektrotechnik und Maschinenbau*, 2 mars 1913, t. XXXI, p. 177.
R.-H. TABER; Armature reaction in direct current machines. *The electric Journal*, 1914, t. XX, p. 65.
- (¹⁴) Th. LEHMANN. *La Lumière électrique*, 1909, t. VIII, p. 103, 137 et 163.
- (¹⁵) R. RICHTER; Das magnetische Feld in den Lufträumen elektrischer Maschinen. *Archiv. für Elektrotechnik*, 10 juillet 1922, n° 3, t. XI.
- (¹⁶) Th. LEHMANN; Das Ankerfeld in der neutralen Zone. *Archiv. für Elektrotechnik*, 1923, t. XII, p. 144.
- Id. Détermination graphique des champs magnétiques laplaciens et tourbillonnaires à lignes de flux planes. *Revue générale de l'Electricité*, 15 et 22 septembre 1923, t. XIV, p. 347 et 395.
- (¹⁷) Voir la note 10.
- (¹⁸) Voir la note 6.
- (¹⁹) Voir la note 5.
- (²⁰) Voir la note 4.
- (²¹) Voir la note 12.
- (²²) F. GUERY; Sur le critérium de bonne commutation de M. Mauduit et la commutation en régime variable. *Bulletin de la Société internationale des Electriciens*, 7 janvier 1914, 3^e série, t. IV, p. 39.
- (²³) Voir la note 7.
- (²⁴) GRATZMULLER; Rappel d'une théorie générale de la commutation. Quelques-unes de ses conséquences. *Bulletin de la Société internationale des Electriciens*, 1914, 3^e série, t. IV, p. 77.
- (²⁵) Voir l'étude de M. MAUDUIT sur le rôle des self-inductions de dérivation. Thèse, p. 182.
- (²⁶) W. WEILER; Die Kommutierung bei Gleichstrommaschine. *Elektrotechnik und Maschinenbau*, 1912, t. XXX, p. 325.
- (²⁷) Dans l'expression de K , telle qu'elle est donnée dans la revue, il s'est glissé, certainement, une faute d'impression, car le premier rapport est inversé.
- (²⁸) G.-N. DODD; Les pôles auxiliaires dans les machines à courant continu; calcul et méthode d'essai. *Proceedings of the american Institute of electrical Engineers*, mai 1909, t. XXVIII, p. 467.
- (²⁹) Voir la note 7.

TABLE DES MATIÈRES

	Paragraphes
PRÉFACE	
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE PREMIER	
Historique de la théorie de la commutation.....	2
CHAPITRE II	
Etude expérimentale des champs dans la dynamo.....	
A. CHAMPS STATIQUES.....	5
α) Induit dans l'air.....	6
β) Etude du champ magnétique d'un induit dans sa carcasse.....	12
B. CALCUL DU CHAMP QUI ENTRE DANS LA COMMUTATION.....	16
C. CHAMPS DYNAMIQUES.....	17
D. CONCLUSIONS.....	23
CHAPITRE III	
Etude de la commutation sans pôles auxiliaires	
A. INTRODUCTION.....	24
B. MOYEN D'INVESTIGATION.....	25
C. PRÉPARATION DES BALAIS ET DU COLLECTEUR.....	26
D. BALAI EG 3450.....	27
E. BALAI LFC ₃ BS.....	33
F. COMPARAISON ENTRE LES BALAIS EG 3450 ET LFC ₃ BS.....	
α) Sur la dynamo.....	34
β) Commutation sur la section artificielle.....	36
G. OBSERVATIONS SUR LA COMMUTATION.....	43
H. CRITÉRIUM D'UNE BONNE COMMUTATION.....	45
CHAPITRE IV	
Etude de la commutation avec pôles auxiliaires	
A. INTRODUCTION.....	48
B. COMPARAISON ENTRE LES BALAIS EG 3450 ET LFC ₃ BS.....	49
C. RÉGLAGE DES POLES AUXILIAIRES.....	55
D. DIFFÉRENTS FONCTIONNEMENTS DE LA MACHINE.....	57
E. CALCUL DES POLES AUXILIAIRES.....	58
Conclusions.....	59

DEUXIÈME THÈSE

Proposition donnée par la Faculté :

Protection des réseaux de transport et de distribution d'énergie électrique contre les surintensités

VU ET APPROUVÉ :

Nancy, le 19 février 1925.

Le Doyen de la Faculté des Sciences,

Signé : P. PETIT.

VU ET PERMIS D'IMPRIMER :

Nancy, le 20 février 1925.

Le Recteur de l'Académie de Nancy,

Signé : CH. ADAM,

Membre de l'Institut.

